

С.А. Кондратьев, М.М. Мельник, М.В. Шмакова, В.И. Уличев

ДИФфузная биоГенная нагрузка на Чудско-Псковское озеро с российской водосборной территории в современных условиях*

Проведен анализ условий формирования природной и антропогенной составляющих диффузной биоГенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро на современном этапе. Полученные результаты свидетельствуют о том, что не только тип подстилающей поверхности является определяющим фактором выноса биоГенных веществ с рассматриваемых водосборов. На настоящий момент отсутствует информация обо всех источниках биоГенного загрязнения водотоков бассейна Чудско-Псковского озера. С использованием методов математического моделирования дана количественная оценка нагрузки от известных источников с учетом параметров распределения годовых значений. Основной рекомендацией по снижению диффузной биоГенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро с Российской части водосбора является оптимизация сельскохозяйственной деятельности, обеспечивающая максимальное использование органических удобрений при выращивании сельскохозяйственных культур с последующим выведением содержащихся в них биоГенных веществ из биоГенного баланса водосбора.

Ключевые слова:

биоГенные вещества, водосбор, диффузная нагрузка, озеро, сток, детерминировано-стохастическая модель.

Чудско-Псковское озеро (Peipsi-Pihkva – эст.) – четвертый по величине пресноводный водоем Европы и крупнейший Европейский трансграничный водоем, расположенный на границе между Россией и Эстонией. Общая площадь озера составляет 3555 км², из них 1985 км² относится к России и 1570 км² – к Эстонии. Водоем делится на три основные части: Чудское озеро с площадью акватории 2611 км², Псковское озеро – 708 км² и соединяющее их Теплое озеро – 236 км². Общий объем водной массы Чудско-Псковского озера составляет 25.07 км³, из них объем водной массы Чудского озера – 21,79 км³, Псковского озера – 0,60 км³, Теплового озера – 2,68 км³. Средняя глубина Чудского озера – 8,3 м, Псковского озера – 3,8 м, Теплового озера – 2,5 м [1; 5]. Схема водоема приведена на рис. 1.

Общая водосборная площадь составляет ~44000 км², из которой 26% находится в Эстонии, 67% – в России и 7% – в Латвии. Наиболее крупные притоки – р. Великая с площадью водосбора 25200 км² или 58% общей площади водосбора и р. Эмайыги – 9740 км² или 22% общей площади. Значимыми притоками озера на российской части водосбора также являются реки Желча, Пиуза и Гдовка с площадями водосбора 1200, 800 и 150 км² соответственно.

Ранее изучение формирования биоГенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро, которая определяет его эвтрофирование,

проводилось в рамках проекта TACIS «План управления водными ресурсами бассейна реки Нарва и Чудского озера» [4] и гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 08-05-13533-офи_ц «Разработка комплекса моделей для оценки изменений качества воды крупного пресноводного водоема под влиянием гидрометеорологических факторов и хозяйственной деятельности на водосборе (на примере Чудско-Псковского озера)» [1]. В соответствии с результатами указанных исследований биоГенная нагрузка на Чудско-Псковское озеро в начале прошлого десятилетия оценивалась в 654 т Р год⁻¹ и 7672 т N год⁻¹. При этом наиболее значимый вклад в фосфорную нагрузку, определяющую скорость антропогенного эвтрофирования водоема, вносят продукты животноводства, составляющие 54% от значения нагрузки на водосбор. При этом природная (фоновая) компонента нагрузки составляет 36% – для фосфора и 45% – для азота от значений суммарной нагрузки на озеро [3].

Целью настоящей работы является анализ условий формирования природной и антропогенной составляющих диффузной биоГенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро на современном этапе, ее количественная оценка (с учетом параметров распределения годовых значений) и выявление основных направлений снижения.

* Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке НЛБВУ (федеральный контракт № 23/12-200 от 17.12.2012) и РФФИ (грант № 12-05-00702-а).

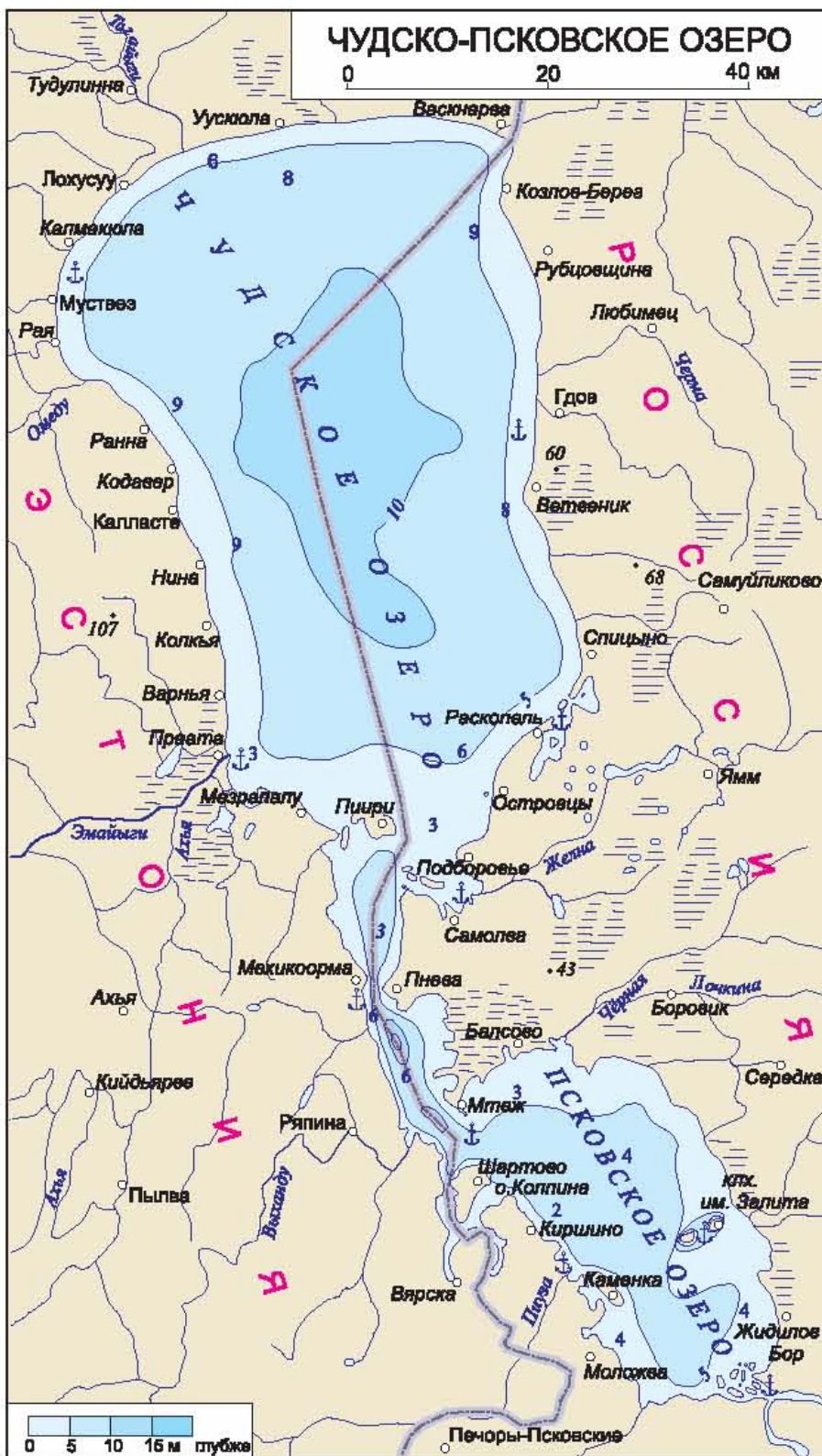


Рис.1. Схема Чудско-Псковского озера.

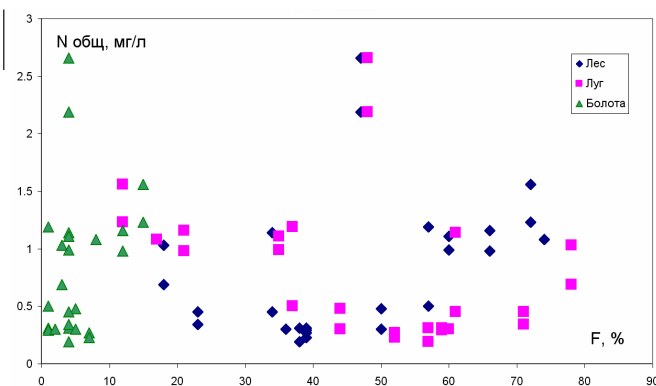


Рис. 3. Взаимосвязь между измеренными значениями концентраций *N*общ и структурой подстилающей поверхности водосборов.

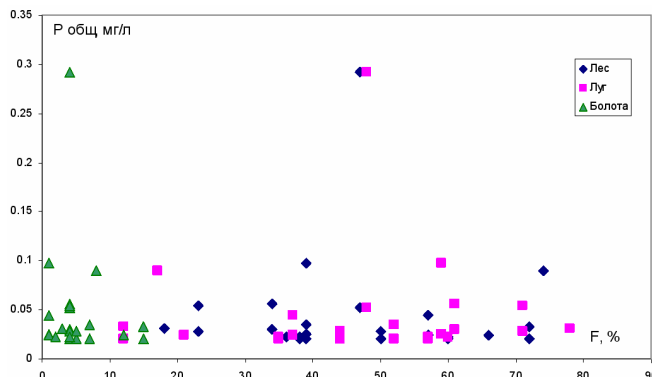


Рис. 4. Взаимосвязь между измеренными значениями концентраций *P*общ и структурой подстилающей поверхности водосборов.

ющих вынос азота и фосфора (рис. 3 и 4). Из представленных графиков следует, что в рассматриваемом случае вовсе не тип подстилающей поверхности является определяющим фактором выноса биогенных веществ.

Подтверждением сказанного выше являются и данные, приведенные на рис. 5. Здесь представлено сравнение выноса азота и фосфора с водосборов рек Желча и Утроя. Принципиальное различие между ними состоит в том, что водосбор Желчи более чем на 70% покрыт лесом, а водосбор Утрои – более чем на 70% полем. Существующие представления об эмиссии биогенных веществ для лесных и полевых участков говорят о том, что концентрации азота и фосфора в стоке Утрои должны существенно превышать значения концентраций в Желче. Однако результаты измерений 2013 г. показывают обратное.

На основании изложенного можно заключить, что на настоящий момент отсут-

ствует информация обо всех источниках загрязнения водотоков Российской части бассейна Чудско-Псковского озера. Не только тип подстилающей поверхности определяет содержание азота и фосфора в стоке рек, а последующий мониторинг диффузной нагрузки необходимо сопровождать более детальной идентификацией источников нагрузки.

При решении задачи количественной оценки биогенной нагрузки с использованием методов математического моделирования корректно говорить только о нагрузке, сформированной известными источниками загрязнения. В качестве инструмента для такой оценки использовалась детерминировано-стохастическая модель (ДСМ) стока и биогенной нагрузки, разработанная в Институте озероведения РАН [2].

ДС моделирование стока и биогенной нагрузки на водные объекты основано на использовании гидрологической модели, модели биогенной нагрузки и стохастической модели погоды (СМП), которая обеспечивает метеорологическими рядами гидрологическую модель (рис. 6).

В рамках ДС моделирования стока и биогенной нагрузки решаются следующие задачи:

1. Оценка параметров СМП для наблюдаемых рядов метеорологических элементов (среднесуточная температура воздуха, суточные слои осадков).
2. Имитационное моделирование рядов метеорологических элементов продолжительной длины.
3. Пересчет суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные значения.
4. Моделирование месячных (годовых) слоев стока по гидрологической модели.
5. Моделирование годовых значений биогенной нагрузки (фосфор, азот) по модели биогенной нагрузки.
6. Оценка параметров распределения годовых значений биогенной нагрузки – среднего и среднего квадратичного отклонения.

Итогом ДС моделирования в данном случае является набор кривых распределения годовых значений стока и биогенной нагрузки.

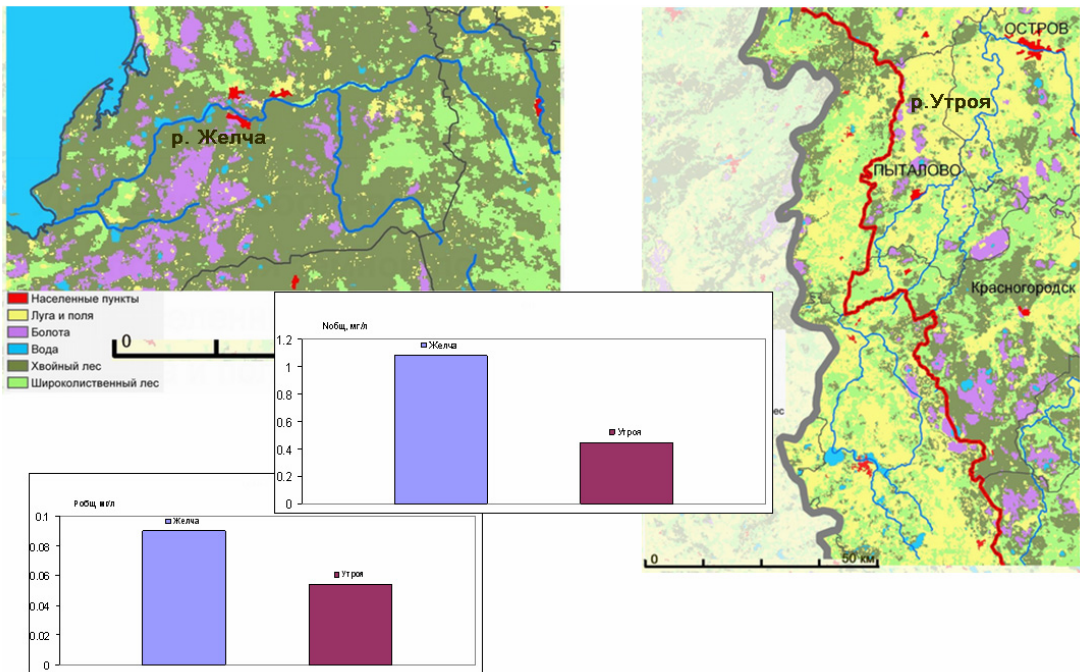


Рис. 5. Сравнение концентраций общего азота и общего фосфора в стоке водосборов рек Желча и Утроя.



Рис. 6. Схема ДС моделирования стока и биогенной нагрузки.

При выполнении расчетов следует обратить особое внимание на информацию о биогенном балансе сельскохозяйственных водосборов Псковской области, приведенном в табл. 2. Анализ данных таблицы позволяет сделать следующие интересные выводы:

1. Начиная с 90-х годов прошлого века вынос биогенных веществ с выращенным урожаем существенно превосходит пополнение запасов питательных веществ в действующем слое почвы за счет внесения удобрений.

2. Сказанное приводит как к снижению урожайности, так и к уменьшению выноса с сельхозугодий за счет снижения содержания биогенных веществ в почвенных водах. В пределе – это фоновый вынос для данного типа почв. Однако процесс происходит не быстро, значительный запас биогенных веществ в почвах сельхозугодий позволит сохраняться современному уровню биогенной эмиссии еще достаточно долго.

3. В качестве органических удобрений на поля вносятся не более 20% биогенных веществ, входящих в состав образующегося на фермах органического вещества, соответствующего численности домашних животных. Куда девается оставшаяся часть потенциальных органических удобрений – неизвестно. Часть из них наверняка принимает участие в формировании биогенной нагрузки. Однако официальной, точной и достоверной информации об этом нет, поэтому и соответствующих расчетов не может быть проведено.

Таким образом, при выполнении расчетов диффузной биогенной нагрузки на озеро можно не учитывать влияние внесения удобрений как минеральных, так и органических, поскольку оно компенсируется высоким уровнем выноса с урожаем.

В проведенном моделировании принимают участие такие источники биогенной

Элементы биогенного баланса сельскохозяйственных водосборов Псковской области

	1990 г.	2000 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
Внесено НРК, тыс. т д.в.:	50.5	8.2	3.9	3.6	3.8	4.2	4.2	4.0
– с минеральными удобрениями	14.3	1.7	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.0
– с органическими удобрениями	36.2	6.5	3.3	3.0	3.0	3.2	3.0	3.0
Вынос НРК с урожаем с/х культур, тыс. т д.в.	44.5	15.1	13.8	11.0	14.0	12.5	15.1	12.5

нагрузки, как атмосферные выпадения, природная эмиссия из почв, эмиссия био-генных веществ с различных типов подстилающей поверхности. Результаты расчетов стока и выноса биогенных веществ с водосбора представлены в табл. 3. Здесь приведены параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока с водосбора, средние значения нагрузки общим фосфором и общим азотом (400 т Р/год, 8549 т N/год) и ее природной составляющей (269 т Р/год, 3573 т N/год) на Чудско-Псковское озеро с Российской части водосбора, их средние квадратичные отклонения, а также значения, рассчитанные для многолетних (обеспеченностью 1 и 5%) и маловодных (обеспеченностью 95 и 99%) лет. Нетрудно видеть, что изменчивость стока в зависимости от метеорологических параметров более существенна по сравнению с изменчивостью биогенной нагрузки. Сказанное объясняется тем, что не все источники нагрузки напрямую зависят от водности года.

Следует помнить, что расчеты, результаты которых представлены в табл. 3, выполнены для известных источников нагрузки без учета влияния минеральных и органических удобрений, которые с избытком компенсируются выносом био-генных веществ с выращенным урожаем. К этим значениям (400 т Р/год, 8549 т N/год) должна приближаться реальная нагрузка

при минимизации объемов неизвестных на настоящий момент поступлений азота и фосфора.

Не оцениваемые прежде значения био-генной нагрузки разной обеспеченности ориентированы, прежде всего, на решение задач, связанных с планированием мероприятий по снижению поступления био-генных веществ в Чудско-Псковского озера из различных источников, расположенных на территориях, неконтролируемых системой государственного мониторинга. Наличие информации не только о средних значениях нагрузки, но и о нагрузке различной обеспеченности, позволяет существенно расширить область применения математических методов при регламентировании хозяйственной деятельности на водосборе, приводящей к интенсивному поступлению био-генных веществ в водные объекты и вызывающей их антропогенное эвтрофирование.

Полученные в ходе исследования результаты свидетельствуют о том, что не только тип подстилающей поверхности является определяющим фактором выноса био-генных веществ с рассматриваемых водосборов. На настоящий момент отсутствует информация о всех источниках био-генного загрязнения водотоков бассейна Чудско-Псковского озера.

О наличии неизвестных на настоящий момент факторов, воздействующих

Таблица 3

Параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока Q , диффузной био-генной нагрузки $LPdif$ и $LNdif$ на водосбор Чудско-Псковского озера с российской части водосбора, природные составляющей фосфорной и азотной нагрузки $LPnat$ и $LNnat$: среднее – \bar{X} среднее квадратичное отклонение – σ , значения обеспеченностью 1, 5, 25, 75, 95 и 99%

	\bar{X}	σ	$X_{1\%}$	$X_{5\%}$	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{95\%}$	$X_{99\%}$
$Q, м^3/с$	242,41	57,02	375	336	281	204	148	110
$LPdif, т/год$	400	81,52	590	535	455	345	265	210
$LPnat, т/год$	269	50,67	387	353	303	235	185	151
$LNdif, т/год$	8549	2013	13239	11870	9898	7200	5228	3859
$LNnat, т/год$	3573	841	5533	4961	4136	3010	2185	1613

* при получении дополнительных результатов натурных измерений параметры расчетов могут быть уточнены.

на вынос биогенных веществ с водосбора Чудско-Псковского, говорит тот факт, что образование азота и фосфора на животноводческих предприятиях и птицефабриках намного превосходит нагрузку на водосбор за счет внесения органических удобрений. Можно предположить, что именно эта разница между произведенными и внесенными на поля органическими удобрениями формирует значительную часть биогенной нагрузки. И именно этот фактор формирования нагрузки следует рассматривать в будущих работах наиболее подробно.

Принимая во внимание нормативы HELCOM [6] по внесению фосфора и азота на поля с органическими удобрениями ($25 \text{ кг P га}^{-1}\text{год}^{-1}$ и $170 \text{ кг N га}^{-1}\text{год}^{-1}$) можно оценить верхний предел внесения биогенных веществ на площадь сельхоз угодий водосбора в $23296 \text{ т P год}^{-1}$ и $158\,418 \text{ т N год}^{-1}$. Приведенные цифры более чем на порядок превосходят значения $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$, которые образуются за год на фермах и птицефабриках, расположенных на водосборе Чудско-Псковского озера ($1760 \text{ т P год}^{-1}$ и $7240 \text{ т N год}^{-1}$). Из сказанного можно заключить, что сельское хозяйство Псковской области имеет большие возможности по использованию удобрений без нарушения рекомендаций HELCOM. В этом случае все образовавшееся на водосборе органическое вещество может быть использовано в сельском хозяйстве Псковской области при соблюдении соответствующих технологий внесения удобрений.

Также следует, что основной рекомендацией по снижению диффузной биоген-

ной нагрузки на Чудско-Псковское озеро с Российской части водосбора является оптимизация сельскохозяйственной деятельности, обеспечивающая максимальное использование органических удобрений при выращивании сельскохозяйственных культур с последующим выведением содержащихся в них биогенных веществ из биогенного баланса водосбора. В этом случае биогенная нагрузка на Чудско-Псковское озеро с Российской части водосбора не будет превышать расчетных значений в среднем составляющих 400 т P год^{-1} и $8549 \text{ т N год}^{-1}$.

Кроме того, на каждом конкретном водосборе, характеризующимся высоким уровнем выноса биогенных веществ, следует принимать локальные инженерные меры по снижению нагрузки на озеро в соответствии с конкретными особенностями объекта. К их числу относятся:

- создание водоохраных зон и прибрежных полос;
- возобновление лесных массивов на водосборном бассейне;
- торфование и землевание почв водосбора;
- вселение высшей водной растительности, ее последующее выкашивание и удаление;
- устройство прудов в гидрографической сети и копаний на пойменных землях;
- обвалование водоемов и отдельных участков гидрографической сети;
- отвод сточных вод от водоема;
- известкование почв, лесных массивов, гидрографической сети.

Список литературы:

- [1] Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю. Моделирование абиотических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). – СПб.: Нестор-История, 2010. – 116 с.
- [2] Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Уличев В.И. Детерминировано-стохастическое моделирование стока и биогенной нагрузки на водные объекты (на примере Финского залива). – СПб.: Нестор-История, 2013. – 36 с.
- [3] Кондратьев С.А., Мельник М.М., Шмакова М.В., Маркова Е.Г., Ульянова Т.Ю. Метод расчета внешней нагрузки на Чудско-Псковское озеро с Российской территории водосбора // Общество. Среда. Развитие. – 2010, № 1. – С. 183–197.
- [4] План управления водными ресурсами бассейна реки Нарва и Чудского озера. Отчет по проекту TACIS. – Псков, Изд-во ПГПИ, 2006. – 286 с.
- [5] Nutrient loads to Lake Peipsi. Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998–1999. – Norwegian Centre for Soil and Environmental Research, Jordforsk Report N4/01, 1999. – 66 p.
- [6] HELCOM Baltic Sea Action Plan. – Helsinki: Helsinki Commission Publ., 2007. – 103 p.