

С.А. Кондратьев, М.М. Мельник, М.В. Шмакова, Е.Г. Маркова, Т.Ю. Ульянова

МЕТОД РАСЧЕТА ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ НА ЧУДСКО-ПСКОВСКОЕ ОЗЕРО С РОССИЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ ВОДОСБОРА*

Предложен метод расчета (математическая модель) выноса химических веществ с водосбора и формирования внешней нагрузки на Чудско-Псковское озеро. Модель позволяет оценивать естественную и антропогенную составляющие нагрузки различного происхождения и ориентирована на существующие возможности информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных объектов и структур государственной статистической отчетности.

Ключевые слова:

биогенные вещества, водосбор, вынос химических веществ, математическая модель, металлы, нагрузка, озеро, сток, удержание

Необходимым условием создания системы охраны и рационального использования водного объекта (водоема или водотока), а также управления его ресурсами является наличие расчетного метода или математической модели, связывающих нагрузку от различных источников на водосбор с нагрузкой на водоем, а затем с показателями качества воды и экологического состояния. Отсутствие такой модели делает практически невозможным решение задачи по научно-обоснованному выбору путей снижения нагрузки за счет изменений интенсивности каких-либо источников загрязнения, а также достижения заданных характеристик качества воды в водоеме и заданного экологического статуса.

Целью настоящей работы является разработка и усовершенствование метода расчета (математической модели) выноса химических веществ с водосбора и формирования внешней нагрузки на крупные водоемы северо-запада России, в первую очередь – на Чудско-Псковское озеро. Модель позволяет оценивать естественную и антропогенную составляющие нагрузки различного происхождения и 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.

Чудско-Псковское озеро – четвертый по величине пресноводный водоем Европы и крупнейший Европейский трансграничный водоем, так как он расположен 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 [26]. Общая водосборная площадь составляет ~ 44000 км², из которых 26 % находится в Эстонии, 67 – в России и 7 – в Латвии. Наиболее крупные притоки – р. Великая с площадью водосбора 25200 км² (58 % общей площади водосбора) и р. Эмайыги – 9740 км² (22 %). Значимыми притоками озера на российской части водосбора также являются реки Желча, Пиуза и Гдовка с площадями водосбора 1200, 800 и 150 км² соответственно.

Государственный мониторинг состояния и загрязнения окружающей природной среды в пределах Российской части Чудско-Псковского водосборного бассейна осуществляется оперативно-производственными структурами Северо-Западного межрегионального территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – регионального подразделения Росгидромета [17]. Мониторинг включает в себя регулярные наблюдения за физико-химическими, гидрохимическими, гидрологическими, метеорологическими и гидробиологическими параметрами окружающей среды (рис.1).

* Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 08-05-13533-офи_ц.



Рис. 1. Схема водосбора Чудско-Псковского озера. Границы: 1 – водосбора; 2 – государственная; 3 – реки; 4 – озера; 5 – населенные пункты; пункты мониторинга: 6 – на акватории; 7 – прибрежные; 8 – на реках; 9 – метеостанции.

В связи с актуальностью проблемы сдерживания эвтрофирования Балтийского моря и крупнейших Европейских озер, расположенных на его водосборе, основное внимание в настоящей работе уделяется расчету биогенной нагрузки общим фосфором ($P_{общ}$) и общим азотом ($N_{общ}$). Сделана первая попытка выполнения расчетов выноса с водосбора р. Великой некоторых растворенных металлов.

По отношению к источникам формирования внешняя нагрузка разделяется на точечную и рассредоточенную. Точечная нагрузка формируется за счет сбросов очищенных и неочищенных сточных вод промышленных, муниципальных и сельскохозяйственных предприятий. Рассредоточенная нагрузка формируется за счет

выноса веществ со всей площади водосбора – эмиссии химических веществ из почв и смыва поверхностных загрязнений [5].

В зависимости от происхождения источника нагрузка может классифицироваться как природная (фоновая, естественная) или антропогенная. Основным источником формирования природной нагрузки является вынос химических веществ с естественных ландшафтов (лесов, болот, лугов естественного происхождения и др.) под воздействием дождевого и талого стоков. Антропогенная составляющая складывается из сбросов сточных вод промышленных, муниципальных и сельскохозяйственных предприятий, а также выноса растворенных и взвешенных примесей с сельскохозяйственных угодий,

пашни, пастбищ, удобряемых и заброшенных территорий.

По терминологии XELKOM PLC-Water [25] объектами применения предлагаемой модели могут служить контролируемые водосборы и неконтролируемые территории, для которых требуется выполнить расчеты следующих характеристик:

1. Суммарной биогенной нагрузки, сформированной точечными и рассредоточенными (диффузными) источниками на поверхности водосбора.

2. Коэффициента удержания, определяющего долю удержания от суммарной нагрузки в зависимости от характеристик стока и гидравлической нагрузки.

3. Удержания биогенного вещества водосбором и гидрографической сетью в зависимости от рассчитанных значений суммарной нагрузки на водосбор и коэффициента удержания.

4. Природной (фоновой) биогенной нагрузки, сформированной за счет выноса с необрабатываемых земель и части выноса с обрабатываемых земель, которая происходит независимо от сельскохозяйственной деятельности.

Необходимое условие практического применения модели на реальных объектах – наличие информации об основных источниках нагрузки на рассматриваемые водосборы. При этом контролируемые водосборы могут являться объектом верификации модели. Общая структура предлагаемой модели, рассчитывающей вынос

химических веществ с водосбора [6], приведена на рис. 2. Модель учитывает вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование нагрузки на водосбор, позволяет рассчитывать вынос примесей с водосбора с выращенным урожаем и под воздействием гидрологических факторов, а также удержания химических веществ водосбором и гидрографической сетью. Конечным итогом моделирования является количественная оценка внешней нагрузки на водоем или водоток и отдельных ее составляющих со стороны водосбора. Более подробное описание предложенной модели, ее математической структуры, возможных параметризаций, используемых предположений и альтернативных методов расчета приведено далее.

Основными составляющими суммарной биогенной нагрузки на водосбор (L_{tot}) являются нагрузка, сформированная точечными источниками (L_p), рассредоточенная эмиссия химических веществ различными типами подстилающей поверхности (L_e), нагрузка за счет внесения минеральных удобрений (L_{mf}), нагрузка, сформированная органическими удобрениями (L_{of}), вынос химических веществ с урожаем (L_c) и массообмен с атмосферой (L_a):

$$L_{tot} = L_p + L_e + L_{mf} + L_{of} - L_c \pm L_a \quad (1)$$

Все члены уравнения (1) имеют размерность [М/Т], где М – размерность массы, Т – размерность времени.



Рис. 2. Схема модели выноса химических веществ с водосбора и формирования внешней нагрузки на водоемы.

Основными точечными источниками загрязнения поверхностных вод являются сбросы сточных воды промышленных, сельскохозяйственных и муниципальных предприятий. Расчет значения L_p может выполняться с использованием достаточно простых зависимостей следующего вида [4]:

$$L_p = N_p k_p k_t, \quad (2)$$

где N_p – количество «нагрузкоформирующих единиц», то есть единиц производимой продукции (для промышленных предприятий), голов домашних животных и птицы (для ферм и птицефабрик), жителей (для муниципальных очистных сооружений), k_p – коэффициент эмиссии химического вещества нагрузкоформирующей единицей [MT^{-1}], k_t – безразмерный коэффициент, характеризующий снижение концентрации химических веществ в сточных водах после очистки. Для промышленных и сельскохозяйственных предприятий значения параметров уравнения (2) рекомендуется оценивать на основе планов выпуска продукции, поголовья животных и существующих норм водоотведения [4].

В материалах ХЕЛКОМ [25] расчет биогенной нагрузки $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ на муниципальные очистные сооружения от одного жителя предлагается проводить при следующих значениях коэффициента k_p : 0,9 кг $P_{\text{общ}}$ год $^{-1}$ и 4,4 кг $N_{\text{общ}}$ год $^{-1}$. В работе [21] использованы значения 0,85 кг $P_{\text{общ}}$ год $^{-1}$ (с учетом использования детергентов) и 6,0 кг $N_{\text{общ}}$ год $^{-1}$. В совместных российско-норвежско-шведско-эстонских исследованиях биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро принято значение 4,38 $N_{\text{общ}}$ год $^{-1}$ для одного жителя [27]. При этом механическая очистка, согласно [4], не сказывается на содержании биогенных элементов в сточных водах, а биологическая очистка муниципальных сточных вод приводит к снижению концентрации $P_{\text{общ}}$ на 30 % ($k_t = 0,7$), $N_{\text{общ}}$ на 50 % ($k_t = 0,5$). Более эффективной очистки можно достичь за счет использования дополнительного фильтрования, коагулирования, пенной флотации, озонирования и других технологий.

Очевидно, что для оценки нагрузки от точечных источников на крупные водосборы необходим значительный объем исходной информации о произведенной продукции, технологических особенностях производства, водопотреблении, тех-

нологии очистки сточных вод и т.д. При этом объемы, состав и динамика сбросов загрязненных сточных вод определяются технологическими, социально-экономическими и другими факторами, не всегда имеющими научное объяснение. Естественно возникновение трудностей при сборе такого рода данных и выполнении последующих расчетов. Поэтому, как правило, при разработке моделей формирования нагрузки на водные объекты вклад точечных источников описывается приближенно на основе официальной отчетной статистической информации о проведенных сбросах и в соответствии с официальными перспективными планами совершенствования системы очистки сточных вод на рассматриваемых предприятиях. Несанкционированные и нерегулярные сбросы могут быть учтены только при наличии достоверной информации, что случается крайне редко. В настоящее время основным официальным источником информации о сбросах сточных вод являются статистические формы 2ТПВодхоз 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.

Рассредоточенная нагрузка на водосбор, сформированная в результате эмиссии химических веществ с различных типов подстилающей поверхности (естественных и антропогенных) в стекающие дождевые и талые воды L_e может рассчитываться по формуле:

$$L_e = \sum_i k_{ei} A_i, \quad (3)$$

где k_{ei} – коэффициент эмиссии вещества с i -го типа подстилающей поверхности [$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$], A_i – площадь i -го типа подстилающей поверхности [ЛТ], L – размерность расстояния. Определение значений k_{ei} , зависящих от характеристик подстилающей поверхности, обычно проводится на основе обобщения и анализа материалов полевых исследований. В табл. 1 приведены значения коэффициентов эмиссии k_{ei} общего фосфора и общего азота для различных типов подстилающей поверхности [1; 2; 28], которые можно использовать при расчетах выноса биогенных веществ с водосбора Финского залива.

Коэффициенты эмиссии (кг км⁻² год⁻¹) $P_{общ}$ и $N_{общ}$ в стоке с различных типов подстилающей поверхности

Подстилающая поверхность	Смешанная	Лес	Болото	Пахотные земли	Урбанизированная территория
$P_{общ}$	26	5	0,5	16	57
$N_{общ}$	300	250	350	1500	800

Альтернативным методом расчета расщедоточенной эмиссии химических веществ и нагрузки на водосбор L_e с учетом гидрологических характеристик является использование значений концентраций примеси C [МЛ⁻³] в почвенных водах для различных типов подстилающей поверхности. В этом случае расчетные зависимости имеют вид:

$$L_e = CyA, \quad C = \frac{\sum_i C_i A_i}{\sum_i A_i}, \quad (4)$$

где C_i – средние концентрации примеси в стоке с i -го типа подстилающей поверхности [МЛ⁻³], y – слой стока с водосбора [ЛГ¹]. При необходимости можно выделить вклад поверхностной и внутрипочвенной составляющих в формирование концентрации примеси:

$$C_i = \frac{C_{si} y_{si} + C_{fi} y_{fi}}{y_{si} + y_{fi}}, \quad (5)$$

где C_{fi} и C_{si} – средние концентрации примеси в быстрой и медленной составляющих стока с i -го типа подстилающей поверхности [МЛ⁻³], y_{fi} и y_{si} – слои быстрого (поверхностного) и медленного (внутрипочвенного) стока с i -го типа подстилающей поверхности, соответственно [ЛГ¹].

Для оценки значений концентраций биогенных веществ, входящих в формулы

(4) и (5) и характеризующих эмиссию общего азота и общего фосфора из почв в поверхностные воды, целесообразно использовать результаты натуральных исследований по содержанию растворенных примесей в почвенной воде или первичной ручейковой сети. В табл. 2 приведены значения концентраций $P_{общ}$ и $N_{общ}$ и в почвенной воде для различных типов подстилающей поверхности, полученные по материалам многолетних полевых исследований Института озероведения РАН и в результате обобщения литературных данных [1; 2; 28]. Приведенные данные также могут быть использованы при расчетах выноса биогенных веществ с водосбора Финского залива.

Значения гидрологических характеристик (y , y_{fi} и y_{si}), входящих в формулы (4) и (5), могут приниматься в соответствии с результатами натуральных измерений, рассчитываться по соответствующим функциям распределения или гидрологической модели, описание которой приведено в настоящем разделе работы ниже.

Достаточно высокие значения коэффициентов эмиссии или концентраций в стоке с урбанизированных территорий (табл. 1 и 2) представляют вклад рассредоточенного сельского населения, не имеющего подключения к канализационным сетям и очистным сооружениям. Аналогичный подход к оценке влияния рассредоточенного сельского населения на формирование нагрузки использован в работе специалистов из Германии [24]. Высоко оценен указанный способ оценки вклада рассредоточенного населения в биогенную нагрузку на водосбор в материалах ХЕЛКОМ [25].

Таблица 2

Концентрации (мг дм⁻³) $P_{общ}$ и $N_{общ}$ в почвенных водах и первичных звеньях гидрографической сети для различных типов подстилающей поверхности

Подстилающая поверхность	Смешанная	Лес	Болото	Пахотные земли	Урбанизированная территория
$P_{общ}$	0,12	0,05	0,06	0,08	0,20
$N_{общ}$	1,4	0,7	0,7	3,1	2,3

Минеральные удобрения, вносимые на сельскохозяйственные угодья, являются важной компонентой биогенной нагрузки на водосбор. Выполнять расчет поступления биогенных веществ на водосбор с минеральными удобрениями L_{mf} можно на основе разработанных региональных нормативов их внесения. Однако в современных условиях реальное внесение минеральных удобрений гораздо ниже рекомендованных значений. Поэтому в расчетах целесообразно использовать информацию, предоставляемую Государственными статистическими организациями. Для Ленинградской области источником необходимых данных могут являться статистические отчеты Комитета по агропромышленному и рыбохозяйственному комплексу Ленинградской области [14].

Животноводческие фермы и птицефабрики оказывают воздействие на биогенный баланс водосборов как источники биогенных веществ, содержащихся в навозе и помете. Их последующее хранение и использование в качестве органических удобрений является причиной возникновения еще одной значимой компоненты биогенной нагрузки. Если предположить, что весь образовавшийся на фермах и птицефабриках навоз и помет остается в пределах рассматриваемого водосбора, то приближенная оценка нагрузки L_{of} в формуле (1) может быть выполнена следующим образом:

$$L_{of} = \sum_j k_{fj} N_j, \quad (6)$$

где k_{fj} – коэффициент эмиссии $P_{общ}$ или $N_{общ}$ одного домашнего животного j -го наименования [MT^{-1}], N_j – количество домашних животных (или птицы). В табл. 3 приведены нормативные значения коэффициентов k_f для различных домашних животных и птицы, рассчитанные по данным работ [3; 18]. При этом следует помнить, что очистные сооружения животноводческих ферм и птицефабрик отнесены к точечным источникам загрязнения, так как сведения об их сбросах обычно включаются в формы статистической отчетности 2ТПВодхоз.

В случае, если часть органических удобрений вывозится за пределы водосбора или поступает извне, уравнение (6) принимает вид

$$L_{of} = \sum_j k_{fj} N_j \pm L_{ex}, \quad (7)$$

где L_{ex} – массообмен с соседними территориями.

Для количественной оценки выноса химических веществ за пределы водосбора с собранным урожаем L_c используется следующая расчетная зависимость:

$$L_c = \sum_s K_s U_s A_s, \quad (8)$$

где K_s – вынос химического вещества с растительной массой урожая s -вида сельскохозяйственной культуры [MM^{-1}], U_s – урожайность s -вида сельскохозяйственной культуры [$ML^{-2}T^{-1}$], A_s – площадь, занятая s -видом сельскохозяйственной культуры [L^2]. В табл. 4 содержатся рекомендованные значения параметра K_s для различных сельскохозяйственных культур [16; 20].

Влияние массообмена с атмосферой (L_a) на миграцию общего фосфора в пределах водосбора минимально [27] и выражается лишь в незначительных атмосферных выпадениях (1–2 % от общей фосфорной нагрузки). Принципиально иная ситуация наблюдается в случае азота, являющегося преимущественно воздушным мигрантом. От 50 % и более приходной и расходной составляющих азотного баланса водосбора составляют атмосферные выпадения, фиксация биотой из воздуха, денитрификация и улетучивание [12].

Количественная оценка массообмена азота с атмосферой (L_a) должна учитывать атмосферные выпадения (L_{dep}) с твердыми и жидкими осадками (снегом и дождем), фиксацию азота из атмосферного воздуха биотой (L_{fix}), а также денитрификацию аммонийного азота и его улетучивание (L_{den}):

$$L_a = L_{dep} + L_{fix} - L_{den}. \quad (9)$$

Таблица 3

Коэффициенты эмиссии ($кг\ год^{-1}$) $P_{общ}$ и $N_{общ}$ одного домашнего животного и птицы

Наименование	$P_{общ}$	$N_{общ}$
Крупный рогатый скот	18,9	77,1
Свиньи	3,36	14,4
Куры	0,28	1,14

**Вынос биогенных веществ сельскохозяйственными культурами (K_s , кг ц⁻¹)
для условий нечерноземной зоны России**

Сельскохозяйственная культура	$N_{\text{общ}}$	P_{205}
Озимая пшеница	3,40	0,90
Озимая рожь	2,45	1,20
Ячмень	2,60	1,00
Овес	2,80	1,30
Картофель ранний	0,50	0,15
Картофель поздний	0,60	0,20
Свекла кормовая	0,65	0,15
Турнепс	0,48	0,17
Однолетние травы на зеленый корм и силос	0,14	0,16
Многолетние травы на силос	0,37	0,15
Многолетние травы на сено	1,76	0,63
Клевер (сено)	2,00	0,60
Капуста белокочанная	0,34	0,13
Морковь столовая	0,32	0,16
Морковь кормовая	0,50	0,20
Свекла столовая	0,27	0,15
Брюква столовая	0,55	0,31
Брюква кормовая	0,35	0,10
Культурное пастбище (зеленый корм)	0,30	0,12
Естественные сенокосы	1,70	0,71

Атмосферные выпадения могут рассчитываться как с помощью методов математического моделирования атмосферного переноса примесей, так и по результатам непосредственных измерений химического состава жидких и твердых атмосферных выпадений. С начала 1970-х гг. в Европе работает Программа ЕМЕР (Европейская совместная программа мониторинга и оценки переноса воздушных загрязнений на большие расстояния) [30]. В рамках исследований по Программе ЕМЕР разработан ряд моделей, описывающих атмосферный перенос и выпадения на подстилающую поверхность химических, аэрозольных и радиоактивных загрязнений. Входными параметрами таких моделей обычно служат скорость и направление ветра, высота расположения и мощность источника, время суток и степень покрытия неба облаками, параметры шероховатости подстилающей поверхности и скорости осаждения частиц. На выходе модели рассчитываются, как правило, атмосферные концентрации загрязняющего вещества и плотность выпадений на подстилающую поверхность. Модели атмосферного пере-

носа позволяют оценить уровень фоновых выпадений, сформированных не только близлежащими выбросами, но и расположенными на значительном расстоянии. Для этого достаточно воспользоваться результатами расчетов по моделям атмосферного переноса, представленных в виде карт. Однако в реальности всегда имеются неучтенные при моделировании точечные и рассредоточенные источники эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу, которые, возможно, никак не влияют на трансграничный перенос примесей, но существенно воздействуют на конкретный водоем или его водосбор, расположенные в зоне выбросов.

Натурное измерение атмосферной нагрузки обычно связано с гидрохимическим анализом проб осадков и последующей интерполяцией и экстраполяцией данных. В исследованиях Института озероведения РАН получены следующие оценки атмосферной составляющей биогенной нагрузки: 2 кг $P_{\text{общ}}$ км⁻² год⁻¹ и 465 кг $N_{\text{общ}}$ км⁻² год⁻¹ для акватории Ладожского озера [7; 10]; 9 кг $P_{\text{общ}}$ км⁻² год⁻¹ и 820 кг $N_{\text{общ}}$ км⁻² год⁻¹ для акватории Невской губы [8; 19]. При рас-

четах биогенной нагрузки на водосбор Чудско-Псковского озера эстонскими специалистами использованы следующие величины: $5 \text{ кг } P_{\text{общ}} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ и $770 \text{ кг } N_{\text{общ}} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ [27]. По данным экспериментальных исследований Института водных проблем Севера РАН для условий Карелии атмосферная нагрузка биогенными веществами составляет $3,12\text{--}13,8 \text{ кг } P_{\text{общ}} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ и $160\text{--}465 \text{ кг } N_{\text{общ}} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ [11]. Картографическое обобщение информации об атмосферной нагрузке биогенных веществ на территорию Северо-Запада России содержится в работе [20]. Очевиден существенный разброс в оценках атмосферных выпадений биогенных веществ на поверхности водосборов и водных акваторий.

Гораздо менее изученными являются вопросы, связанные с расчетами биологической фиксации и улетучивания азота для крупных речных водосборов, характеризующихся неоднородной ландшафтной структурой и сельскохозяйственной освоенностью. В ряде работ приводятся сведения о коэффициентах биологической фиксации азота некоторыми сельскохозяйственными культурами [23]. Однако этой информации оказывается явно недостаточно для проведения расчетов азотного баланса реальных водосборов. Исследования улетучивания азота с поверхности крупных гетерогенных водосборов пока не доведены до стадии создания соответствующих расчетных методов, описывающих весь комплекс физико-химических преобразований соединений азота, оказавшихся по разным причинам на поверхности водосбора или в приповерхностном почвенном слое. Поэтому на настоящем этапе создания и развития модели выноса биогенных веществ с водосбора использовано предположение о равенстве значений поступления азота из атмосферы (выпадения с осадками + фиксация биотой) и улетучивания в результате денитрификации: $L_{\text{dep}} + L_{\text{fix}} = L_{\text{den}}$ [23]. То есть значение L_a в формуле (1) принимается равным нулю. Дальнейшие детальные исследования биогенных балансов водосборов должны привести к созданию более детальных научно-обоснованных расчетных методов, использующих значения физико-химических характеристик подстилающей поверхности и атмосферы.

Как правило, значительная часть химических веществ, поступивших на водосбор от различных источников, не достигает замыкающих створов крупных рек, так как удерживается различными звеньями

гидрографической сети. В соответствии с материалами ХЕЛКОМ [25] расчеты удержания необходимы, прежде всего, для того, чтобы количественно оценить соотношение между сбросами на поверхность водосбора и выносом биогенных веществ в водные объекты. Указанные расчеты могут выполняться с использованием следующих средств:

- результатов непосредственных измерений на входе и выходе изучаемых водных систем, позволяющих экспериментально оценивать коэффициенты удержания;

- математических моделей удержания биогенных веществ в озерах с последующим распространением результатов на всю озерно-речную сеть бассейна, участвующую в удержании;

- математических моделей, описывающих удержание гидрографической сетью, включающей как реки, так и озера.

Там же отмечаются и значительные трудности, связанные с проведением необходимых измерений и сложности параметризации математических моделей [25].

Отечественный опыт расчета удержания биогенных веществ крупными озерно-речными системами и их водосборами представлен моделью фосфорного баланса Невской губы, Ладожского озера и их водосбора [5]. Здесь удержание общего фосфора оценивалось в зависимости от внешней нагрузки на водоем. Коэффициент удержания рассчитывался как функция от слоя стока, площади водосбора и площади водной поверхности. Согласно приведенной выше классификации ХЕЛКОМ, данная модель может быть отнесена ко второй категории расчетных методов, то есть к методам, основанным на оценке удержания биогенных веществ в озерах. К сожалению, для общего азота подобные отечественные методы расчета пока не разработаны.

В настоящей работе для расчета удержания химических веществ водосборами и их гидрографической сетью использована эмпирическая модель, разработанная в Институте пресноводной экологии и рыбоводства Германии [22; 24]. Модель основана на результатах обобщения натуральных наблюдений на 100 европейских реках с площадями водосборов от 121 до 194 000 км² и озерностью 0,2–20,3 % от значений общей площади изучаемых водосборов. В соответствии с предложенным методом вынос вещества с водосбора и нагрузка на водный объект L , принимающий сток

воды и примесей, рассчитывается следующим образом:

$$L = R_i L_{tot} = (1 - R_r) L_{tot}, \quad (10)$$

где R_i и R_r – коэффициенты выноса и удержания вещества (безразм.), соответственно. Авторами модели предложены следующие эмпирические соотношения, связывающие значения упомянутых коэффициентов для общего фосфора, общего и минерального ($N_{мин}$) азота со значениями модуля стока q [$L^3 L^{-2} T^{-1}$] и гидравлической нагрузкой на водные объекты водосбора HL [$L T^{-1}$]:

$$R_i = 1 - R_r = \frac{1}{1 + a_1 q^{b_1}}, \quad (11)$$

$$R_i = 1 - R_r = \frac{1}{1 + a_2 H^{b_2}}, \quad (12)$$

где a_1 , b_1 , a_2 и b_2 – эмпирические параметры (безразм.). При этом значение гидравлической нагрузки HL пропорционально модулю стока q и обратно пропорционально относительной площади водной поверхности W (% от общей площади водосбора):

$$HL = \frac{3.15 q}{W}, \quad (13)$$

если q – в л км² сек⁻¹ и HL – в м год⁻¹. Значения эмпирических параметров a_1 , b_1 , a_2 и b_2 задаются в соответствии с данными табл. 5 [23; 24]. В соответствии с формулами (12) и (13) увеличение площади водных объек-

тов, выраженное в % от общей площади водосбора, приводит к увеличению удержания биогенов и соответственно снижению значений выноса веществ с водосбора. В то же время увеличение стока приводит как к увеличению эмиссии веществ из почв (в соответствии с формулами (4) и (5)), так и к уменьшению удержания биогенов водными объектами водосбора (в соответствии с (11) – (13)).

С использованием уравнения (11) удается оценить удержание химических веществ водосбором и русловой сетью в зависимости от характеристик стока и размеров водосбора. Если изучаемый водосбор характеризуется высоким значением доли водной поверхности в общей площади водосбора, то для расчетов целесообразно применять соотношение (12).

Кроме расчета выноса химических веществ с водосбора и формирования нагрузки на водный объект, принимающий сток воды и химических веществ с водосбора, в настоящей модели предусмотрен расчет фоновой нагрузки. В соответствии с определением ХЕЛКОМ [25] природная (фоновая) нагрузка биогенными веществами формируется за счет их выноса с обрабатываемых земель и части выноса с обрабатываемых земель, которая происходит независимо от сельскохозяйственной деятельности. Таким образом, количественная оценка фоновой нагрузки заключается в выявлении вклада различных (природных и антропогенных) источников в формирование нагрузки и последующем исключении из рассмотрения антропоген-

Таблица 5

Значения эмпирических параметров в формулах (11) и (12)

Вещество	Площадь водосбора	a_1	b_1	a_2	b_2
$P_{общ}$	Для всех водосборов	26,6	-1,71	13,3	-0,93
	<1000 км ²	41,4	-1,93	57,6	-1,26
	1000 – 10000 км ²	21,7	-1,55	9,3	-0,81
	>10000 км ²	28,9	-1,80	26,9	-1,25
$N_{мин}$	Для всех водосборов	6,9	-1,10	5,9	-0,75
	<1000 км ²	3,5	-1,01	3,3	-0,65
	1000 – 10000 км ²	5,8	-0,96	4,4	-0,62
	>10000 км ²	7,9	-1,03	10,9	-0,94
$N_{общ}$	Для всех водосборов	-	-	1,9	-0,49
Cd	Для всех водосборов	31,53	-2,19	13,31	-1,32
Cu	Для всех водосборов	16,91	-1,72	34,21	-1,39
Hg	Для всех водосборов	0,9	-0,12	2,54	-0,61
Pb	Для всех водосборов	7,32	-0,83	3,68	-0,44
Zn	Для всех водосборов	12,31	-1,81	1,07	-0,42

ных составляющих. При проведении расчета фоновой нагрузки на Балтийское море со стороны водосбора из рассмотрения должны быть исключены все антропогенные источники загрязнения (точечные сбросы, внесение минеральных и органических удобрений, эмиссию с сельскохозяйственных и урбанизированных территорий). Коэффициенты эмиссии биогенных веществ с антропогенных типов подстилающей поверхности (сельскохозяйственные угодья, урбанизированные территории) заменяются коэффициентами эмиссии (табл. 1) или концентрациями в стоке с естественных территорий, т.е. с лесов и болот (табл. 2). В этом случае уравнение (1), составляющее основу схемы расчета нагрузки на водосборную площадь, принимает вид:

$$L_{tot} = L_e \pm L_a = \sum_i k_{ei} A_i \pm L_a, \quad (14)$$

где A_i – площадь i -го типа естественной подстилающей поверхности. При этом $\sum A_i$ составляет площадь поверхности всего водосбора. Фоновый вынос химических веществ с водосбора (или фоновая нагрузка на водные объекты) L_n рассчитывается следующим образом:

$$L_n = (1 - R_r) (\sum_i k_{ei} A_i \pm L_a), \quad (15)$$

где R_r – коэффициент удержания вещества, рассчитываемый по уравнениям (11) или (12).

Следует заметить, что схема оценки фоновой биогенной нагрузки, основанная на уравнениях (14) и (15) и построенная в соответствии с рекомендациями ХЕЛКОМ, не позволяет выявить антропогенную и природную составляющие массообмена с атмосферой. Сказанное несущественно сказывается на количественной оценке фоновой нагрузки общим фосфором, так как он является водным мигрантом и значения атмосферных выпадений $P_{общ}$ на поверхность водосбора не превосходят 1–2 % от значения общей фосфорной нагрузки. В отличие от фосфора азот – преимущественно воздушный мигрант. Однако выделение фоновой и антропогенной составляющих массообмена азота с воздушной средой – задача, выходящая за рамки настоящего исследования. Поэтому расчеты, выполненные на основе уравнений (14) и (15), дают только фоновую составляющую выноса азота, определяемую характеристиками водосбора.

Для определения гидрологических характеристик водосбора (слоя стока, расхода воды) заданной вероятности превышения могут быть использованы их аналитические кривые распределения, например, трехпараметрическое гамма-распределение [13], построенные по данным многолетних наблюдений на реках исследуемого региона. Альтернативным способом определения гидрологических характеристик, влияющих на формирование биогенной нагрузки на водные объекты, является использование гидрологической модели, позволяющей рассчитывать слой стока и расходы воды в зависимости от конкретных гидрометеорологических параметров (осадков и температуры воздуха). В качестве такой модели может быть использована модель, разработанная в Институте озероведения РАН [5; 9]. Модель имеет концептуальную основу и описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади. Модель может работать как с месячным шагом по времени, так и с годовым. В процессе моделирования водосбор представляется в виде однородной имитирующей емкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей.

Значения основных параметров гидрологической модели, определяющих форму гидрографа стока, определяются в зависимости от озерности, т.е. доли площади водоемов в общей площади водосбора [5]. С использованием в качестве входной информации метеорологических данных об осадках и температуре воздуха выполнены расчеты стока с водосбора р. Великой (створы – Опочка и Псков), которые подтвердили адекватность модели изучаемым процессам. Сравнение наблюдаемых и рассчитанных среднегодовых слоев стока р. Великой (створ – Псков, 22400 км²) за 1990–2003 гг. приведено на рис. 3. Здесь же содержится информация о годовых слоях осадков за указанный период времени. Результаты расчетов по гидрологической модели явились основой для последующих расчетов выноса химических веществ с водосбора и формирования нагрузки на водоем.

По сравнению с предыдущим вариантом расчетной схема фосфорной нагрузки на крупные водоемы Северо-Запада Рос-

сии [5] в модель внесены следующие усовершенствования, основанные на анализе результатов зарубежных исследований в области моделирования нагрузки на водоемы, а также собственном опыте выполнения расчетов для изучаемого водосбора:

1. В модель добавлен блок расчета выноса общего азота и металлов. На настоящем этапе развития модели использовано предположение о равенстве значений поступления азота из атмосферы (выпадения с осадками + фиксация биотой) и улетучивания в результате денитрификации: $L_{dep} + L_{fix} = L_{den}$ [23]. То есть значение L_a в формуле (1) принимается равным нулю.

2. Предполагается, что 100 % биогенных веществ, образовавшихся в животноводстве и птицеводстве, остаются на водосборе и участвуют в формировании нагрузки.

3. Значительная часть биогенных веществ, поступивших на сельскохозяйственные угодья, выносятся за пределы водосбора с собранным урожаем и не участвует в формировании биогенной нагрузки на водосбор и, затем, на озеро. Количественная оценка выноса с урожаем проводится с использованием формулы (8) и данных табл. 4.

Как отмечалось выше, предложенная модель ориентирована на существующие

возможности информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных объектов, а также структур государственной статистической отчетности о сбросах сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборах северо-западного региона России. Ограниченность отечественной системы сбора данных по основным составляющим точечной и рассредоточенной нагрузки, а также факторам, их определяющим, не позволила использовать в модели более детальные методы расчета характеристик стока и выноса примесей с учетом их внутригодовой динамики и неоднородностей по площади водосбора [5].

Расчеты показали удовлетворительное соответствие рассчитанных и измеренных характеристик выноса растворенных примесей. Можно констатировать, что результаты расчетов близки средним значениям выноса общего фосфора, общего азота, свинца и меди со стоком р. Великой за рассмотренный период времени. Трудно ожидать лучших результатов при достаточно низкой достоверности данных мониторинга. Примеры результатов моделирования выноса $P_{общ}$ и $N_{общ}$ со стоком р. Великой (створ – Псков) приведены на рис. 4. Результаты моделирования выноса Cu и Pb – на рис. 5.

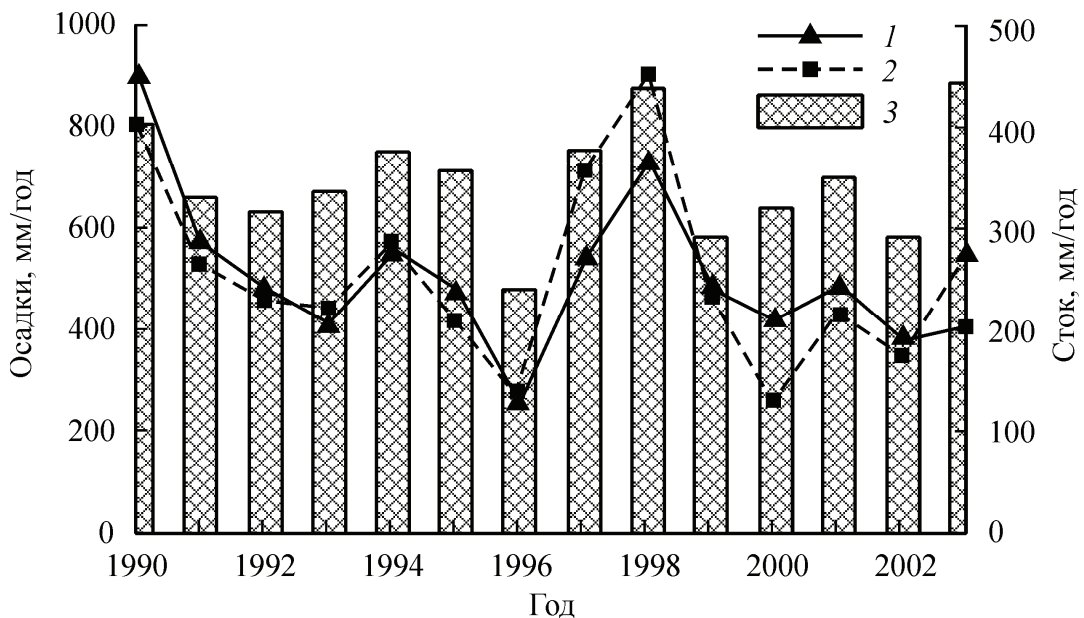


Рис. 3. Наблюдаемые (1) и рассчитанные (2) слои стока р. Великой (створ – Псков), а также слои осадков (3) за 1990–2003 гг.

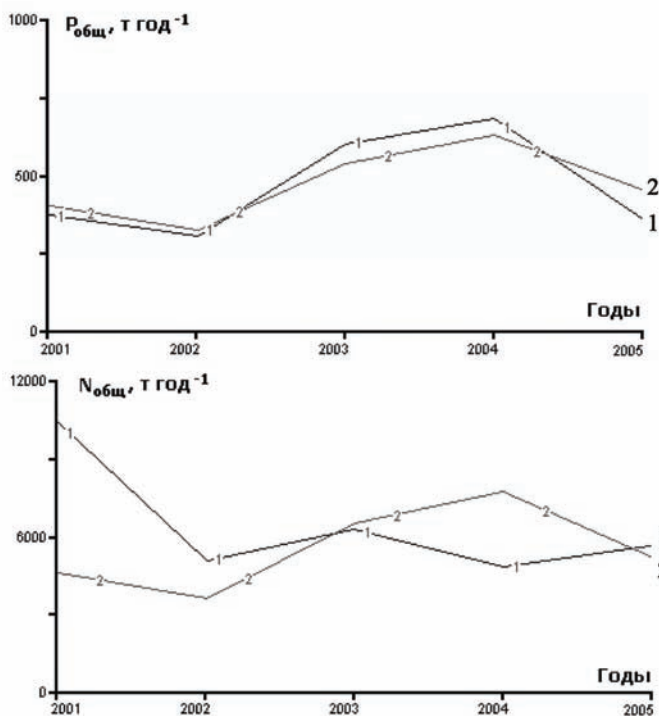


Рис. 4. Вынос биогенных веществ со стоком р. Великой (створ – Псков) по результатам измерений (1) и моделирования (2).

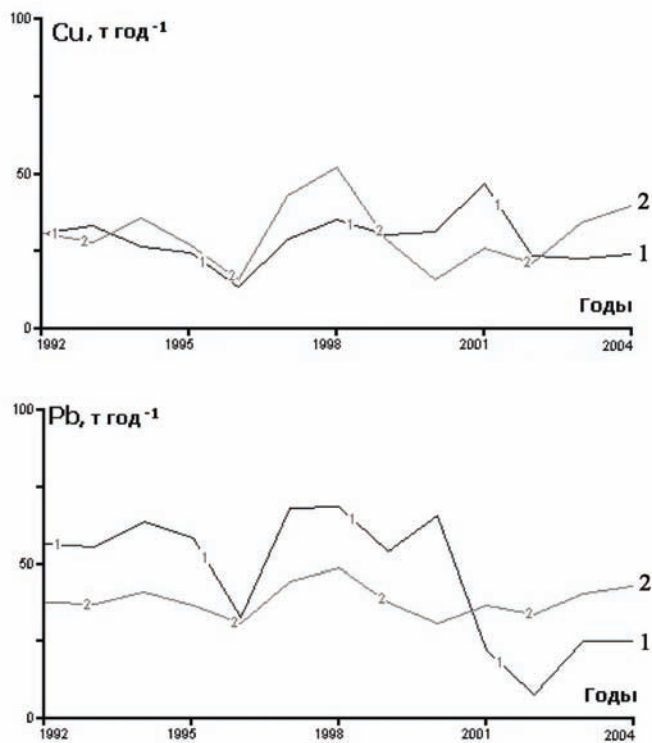


Рис. 5. Вынос растворенных металлов со стоком р. Великой (створ – Псков) по результатам измерений (1) и моделирования (2).

Вынос химических веществ с Российской части водосбора и нагрузка на Чудско-Псковское озеро в значительной степени зависят от водности года и стока с водосбора. С целью количественной оценки упомянутой зависимости выполнена серия имитационных расчетов формирования биогенной нагрузки на озеро при различных значениях слоя стока с водосбора. При этом значения характеристик точечных и рассредоточенных источников биогенной нагрузки на водосбор принимались соответствующими условиям 2005 г. Полученные результаты в виде прямых пропорциональных и близких к линейной зависимостей нагрузки $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ на озеро от стока представлены на рис. 6 и 7. Реальная изменчивость слоя стока в интервале значений от 150 до 400 мм год⁻¹ приводит согласно результатов расчета к изменчивости биогенной нагрузки на озеро в интервалах 376–1015 т год⁻¹ для фосфора и 3964–1691 т год⁻¹ для азота (при норме стока, составляющей 260 мм год⁻¹).

Количественная оценка основных компонентов биогенной нагрузки на Российскую часть водосбора Чудско-Псковского

озера и на сам водоем, выполненная в соответствии с рекомендациями ХЕЛКОМ [25] пропорционально соотношению площадей рассматриваемых водосборов, для условий 2005 г при значении слоя стока, равному норме, приведена в табл. 6.

Полученные результаты говорят о том, что наиболее существенный вклад в фосфорную нагрузку на Российскую часть водосбора вносят продукты животноводства (навоз, образовавшийся на фермах), составляющие 54 % от значения нагрузки на водосбор. Для азотной нагрузки существенен вклад эмиссии из почв – 56 % от значения нагрузки на водосбор. Однако, как это следует из предшествующих рассуждений и структуры модели, основанной на уравнении (1), не все биогенные вещества, попавшие на поверхность водосбора, достигают озера. Вынос $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ с водосбора с выращенным урожаем и удержание биогенных веществ гидрографической сетью являются причиной того, что нагрузка на озеро снижается примерно на 78 % для фосфора и 64 % для азота по сравнению с нагрузкой на водосбор.

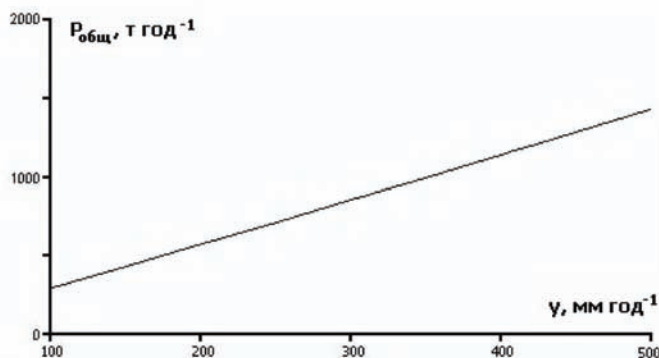


Рис. 6. Зависимость нагрузки $P_{\text{общ}}$ на Чудско-Псковское озеро с Российской части водосбора в зависимости от слоя стока y .

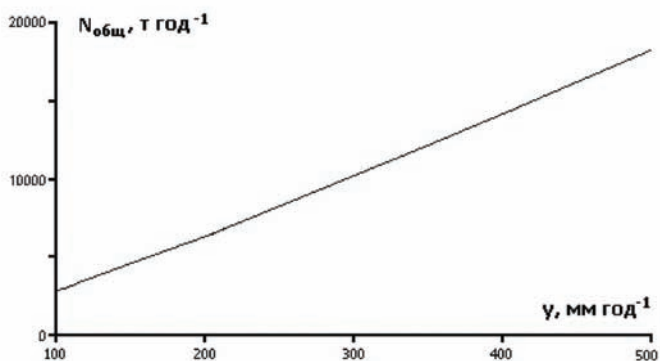


Рис. 7. Зависимость нагрузки $N_{\text{общ}}$ на Чудско-Псковское озеро с Российской части водосбора в зависимости от слоя стока y .

Основные компоненты биогенной нагрузки (т год⁻¹) на Чудско-Псковское озеро с Российской части водосбора (29500 км²), рассчитанные для нормы стока (260 мм год⁻¹)

Вещество	P _{общ}	N _{общ}
Эмиссия из почв L _c	732	11938
Массообмен с атмосферой L _a	146	-
Сбросы точечных источников L _p	83	439
Минеральные удобрения L _{mf}	28	1133
Продукты животноводства L _{of1}	1568	6538
Продукты птицеводства L _{of2}	369	1501
Всего на Российскую часть водосбора	2926	21449
Вынос с урожаем	1471	9627
Удержание водосбором и гидрографической сетью	801	4150
Нагрузка на озеро с Российской части водосбора	654	7672
В том числе естественная составляющая	235	3415

Природная (фоновая) компонента нагрузки составляет 36 % для фосфора и 45 % – для азота от значений суммарной нагрузки озеро.

Следует отметить, что достоверность сделанных оценок в значительной степени зависит от достоверности исходных данных, использованных при моделировании.

Анализ результатов, полученных в ходе исследований по разработке и совершенствованию методов расчета нагрузки на Чудско-Псковское озеро с Российской части водосбора, позволяет сделать следующие выводы.

1. Предложена модель, позволяющая оценивать основные составляющие нагрузки общего фосфора, общего азота и некоторых металлов, как на водосбор, так и на озеро. Модель может использоваться для проведения имитационных расчетов с целью оценки эффективности различных мероприятий по снижению антропогенного воздействия на Чудско-Псковское озеро и его водосбор.

2. Существенной доработки требует блок модели, рассчитывающий массообмен азотом между водосбором и атмосферой. В настоящем варианте модели использовано достаточно грубое предположение о

равенстве значений поступления азота из атмосферы (выпадения с осадками + фиксация биотой) и улетучивания в результате денитрификации, заимствованное из работ немецких специалистов [23].

3. Отсутствуют данные об использовании и перемещении по площади водосбора или за его пределы навоза и помета, образовавшегося на фермах и птицефабриках. Поэтому в работе использовано предположение о том, что 100 % биогенных веществ, образовавшихся в животноводстве и птицеводстве, остаются на водосборе и участвуют в формировании нагрузки. Так ли это на самом деле – одна из задач будущих исследований.

4. Достоверность выполненных оценок в значительной степени зависит от достоверности исходных данных, закладываемых в модель. Однако многие используемые материалы вызывают недоверие. Так, в соответствии с формами статистической отчетности 2ТПВодхоз, вклад точечных источников загрязнения в нагрузку на водосбор ничтожно мал. Даже рассчитанное значение нагрузки, сформированной атмосферными выпадениями фосфора, почти вдвое превосходят фосфорную нагрузку от точечных источников, что маловероятно.

Список литературы

1. Алябина Г.А., Сорокин И.Н. Миграция фосфора и органического вещества в системе «водоем–водосборная площадь» // Экологическая химия. – 1997, N 6 (3). – С. 166–171.
2. Алябина Г.А., Сорокин И.Н. Особенности формирования внешней нагрузки на водные объекты в урбанизированных ландшафтах // Изв. РГО, 2001, N 133 (1). – С. 81–87.
3. Васильев В.А., Филиппова Н.В. Справочник по органическим удобрениям. – М.: Росагропромиздат, 1988. – 255 с.

4. Временные методические рекомендации по прогнозированию химического состава поверхностных вод с учетом перераспределения стока. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 56 с.
5. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. – 253 с.
6. Кондратьев С.А. Математическое моделирование выноса биогенных веществ с притоками Финского залива-Материалы X Международного экологического Форума «День Балтийского моря». – СПб, 2009. – С. 76–78.
7. Кондратьев С.А., Ефремова Л.В., Расплетина Г.Ф. и др. Оценка внешней нагрузки на Ладожское озеро // Экологическая химия. – 1997, N 6 (2). – С. 73–84.
8. Кондратьев С.А., Ефремова Л.В., Сорокин И.Н. и др. Оценка внешней нагрузки на Финский залив // Экологическая химия. – 1996, N 5(4). – С. 240–249.
9. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Изучение формирования стока с речных водосборов методами математического моделирования (на примере бассейна Ладожского озера) / Тр. XII съезда РГО. Т. 6. – СПб.: Наука, 2005. – С. 99–104.
10. Ладожское озеро. Прошлое, настоящее, будущее / Под ред. Румянцева В.А., Драбковой В.Г. – СПб.: Наука, 2002. – 327 с.
11. Лозовик П.А., Потапова И.Ю. 2006. поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. – N 33(1). – С. 111–118.
12. Мишустин Е.Н., Кудеяров В.Н., Башкин В.Н. Круговорот азота на территории СССР / Изв. АН СССР, сер. Биол. – 1983, N 2. – С. 165–178.
13. Определение основных расчётных гидрологических характеристик СП 33–101–2003. – М.: Госстрой России, 2004. – 74 с.
14. Основные показатели агропромышленного и рыбохозяйственного комплекса Ленинградской области в 2007 г. – СПб.: Комитет по агропромышленному и рыбохозяйственному комплексу Ленинградской области, 2000. – 28 с.
15. План управления водными ресурсами бассейна реки Нарва и Чудского озера. Отчет по проекту ТАСИС. – Псков: Изд-во ПГПИ, 2006. – 286 с.
16. Рекомендации. Расчет поступления биогенных элементов в водоемы для прогноза их эвтрофирования и выбора водоохраных мероприятий. – М.: Росагропромиздат, 1989. – 48 с.
17. Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Басова С.Л. и др. Внешняя нагрузка на Чудско-Псковский озерный комплекс: мониторинг и моделирование фосфорного режима // Водные ресурсы. – 2006, № 33 (6). – С. 710–720.
18. Свод правил экологически безопасной сельскохозяйственной практики в условиях Ленинградской области России. Часть 1. Содержание крупного рогатого скота и кормопроизводство. – СПб.-Хельсинки, 2007. – 68 с.; Часть 2. Промышленное птицеводство. – СПб.-Хельсинки, 2007. – 60 с.
19. Финский залив в условиях антропогенного воздействия / Под ред. В.А. Румянцева и В.Г. Драбковой. – СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1999. – 363 с.
20. Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. Управление эвтрофированием водоемов. – СПб.: Гидрометеоздат, 1993. – 278 с.
21. Эволюция круговорота фосфора и эвтрофирование природных вод / Под ред. К.Я. Кондратьева и И.С. Коплан-Дикса. – Л.: Наука, 1988. – 204 с.
22. Behrendt H. Inventories of point and diffuse sources and estimated nutrient loads – A comparison for different river basins in Central Europe // Wat. Sci. Technol., 1996, N 33. – p. 99–107.
23. Behrendt H., Dannowski R. Nutrients and heavy metals in the Odra River system. – Weissensee Verlag Publ., Germany, 2007. – 337 p.
24. Behrendt H., Opitz D. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load // Hydrobiologia. – 1999, N 410. – P. 111–122.
25. Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). – Helsinki, 2007. – 80 p.
26. Lake Peipsi. Meteorology, Hydrology, Hydrochemistry / Ed. T Nxges. – Tartu: Sulemees Publ., 2001. – 163 p.
27. Nutrient loads to Lake Peipsi. Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998–1999 / Jordforsk Report N 4 / 01. – Norwegian Centre for Soil and Environmental Research, 1999. – 66 p.
28. Rekolainen S. 1989. Phosphorus and nitrogen load from forest and agricultural areas in Finland // Aqua Fennica. – 1989, N 19 (2). – P. 95–107.
29. Vink R., Behrendt H. Heavy metal transport in large river systems: heavy metals emission and load in the Rhine and Elbe river basins / Hydrol. Process. – 2002, N 16. – P. 3227–3244.
30. ЕМЕР. Интернет-ресурс. Режим доступа: www.emep.int