

- [39] *Andreassian V.* Waters and forests: from historical controversy to scientific debate // *Journal of Hydrology*. 2004. N 291. P. 1—27.
- [40] *Brain S.* Song of the Forest: Russian Forestry and Stalinist Environmentalism, 1905—1953. Pittsburg, University of Pittsburg Press, 2011. 232 p.
- [41] *Brandes D.* Von den Zaren adoptiert. Die deutschen Kolonisten und die Balkansiedler in Neurupland und Bessarabien 1751—1914. Muenchen: Oldeburg, 1993. 549 S.
- [42] *Fedotova A. A.* The Origins of the Russian Chernozem Soil (Black Earth): Franz Joseph Ruprecht's 'Geo-Botanical Researches into the Chernozem' of 1866 // *Environment and History*. 2010. Vol. 16, N 3. P. 271—293.
- [43] *Fressoz J. B., Locher F.* Le climat fragile de la modernité // *La vie des idées*. 2010. 20 avril. Режим доступа в Интернет: www.laviedesidees.fr
- [44] *Grove R. H.* A historical review of the early institutional and conservationist responses to fears of artificially induced global climate change: the deforestation-desiccation discourse, 1500—1860 // *Chemosphere*. 1994. Vol. 29, N 5. P. 1001—1013.
- [45] *Moon D.* The Plough that Broke the Steppes: Agriculture and Environment on Russia's Grasslands, 1700—1914. Oxford: Oxford University Press, 2013. 332 p.

Санкт-Петербург
f.anastasia.spb@gmail.com
mvlosk @yandex.ru

Поступило в редакцию
5 августа 2013 г.

*Институт истории естествознания
и техники им. С. И. Вавилова РАН,
Санкт-Петербургский филиал
**Высшая школа экономики
Национальный исследовательский университет
Санкт-Петербургский филиал

Изв. РГО. 2013. Т. 145. Вып. 6

© С. А. КОНДРАТЬЕВ, В. И. УЛИЧЕВ, Н. В. ВИКТОРОВА

ОЦЕНКА ФОНОВОГО ВЫНОСА БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ С ВОДОСБОРА ФИНСКОГО ЗАЛИВА

В зависимости от происхождения источника внешняя нагрузка на водный объект может классифицироваться как природная 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 урбанизированных территорий.

Цель исследования — количественная оценка природной (фоновой) составляющей внешней биогенной нагрузки, формирующейся на российской части водосбора Финского залива Балтийского моря.

В соответствии с материалами Хельсинкской комиссии — ХЕЛКОМ [5, с. 45] фоновая нагрузка биогенными веществами состоит из следующих компонентов:

- вынос с необрабатываемых земель;
- часть выноса с обрабатываемых земель, которая происходит независимо от сельскохозяйственной деятельности.

Там же предлагается для оценки фоновой нагрузки использовать следующие основные подходы:

- мониторинг небольших необрабатываемых земель, вынос с которых соответствует природным условиям;
- использование математических моделей, позволяющих выявить вклад различных (природных и антропогенных) источников в формирование нагрузки и затем исключение из расчетов антропогенных составляющих.

Первый из приведенных подходов к оценке фоновой нагрузки на Финский залив реализован в Институте озерадения РАН на основе использования результатов многолетних стационарных и полевых исследований на водосборах Северо-Запада России, подверженных минимальному антропогенному воздействию. Выполнены количественная оценка и регионализация модулей природного выноса не только биогенных веществ (общего фосфора $P_{\text{общ}}$ и общего азота $N_{\text{общ}}$ — по данным обработки нефилтрованных проб воды), но и органического углерода $C_{\text{орг}}$, взвешенных веществ ВВ и некоторых металлов (медь Cu , марганец Mn и железо Fe) с российской части водосбора. Результаты оценки модулей выноса $P_{\text{общ}}$, $N_{\text{общ}}$ и $C_{\text{орг}}$ опубликованы ранее [2, с. 132]. За основу регионализации модулей выноса примесей принята схема российской части водосбора Финского залива, предложенная в [3, с. 16] и представленная на рис. 1. Результаты количественной оценки модулей выноса всех рассмотренных веществ содержатся в табл. 1.

В результате проведенного исследования установлена значительная амплитуда колебаний модулей выноса органического вещества и биогенных элементов на территории Северо-Запада России, связанная с геохимическими и геоморфологическими особенностями подстилающей поверхности. Экстремальные значения модулей выноса $C_{\text{орг}}$ и $P_{\text{общ}}$ характерны для ландшафтов в области Балтийского кристаллического щита (13.0—14.5 кг P км⁻²год⁻¹ и 330—550 т $C_{\text{орг}}$ км⁻²год⁻¹), что подтверждает определяющую роль литологического состава материнских пород в миграции исследуемых химических веществ.

Вынос $N_{\text{общ}}$ практически не зависит от расположения водосбора в пределах изучаемой территории и особенностей подстилающей поверхности. Наименьшие значения модулей выноса $N_{\text{общ}}$ (от 160 до 300 кг км⁻²год⁻¹) характерны для водосборов, расположенных в холмисто-моренном рельефе (район 2в), наибольшие (от 330 до 550 кг км⁻²год⁻¹) — в районах 1б и 1в. Небольшая амплитуда колебаний значений модулей фонового выноса $N_{\text{общ}}$, по-видимому, следствие того, что массообмен с атмосферой является основной составляющей азотного баланса как для водоемов, так и для водосборов изучаемого региона.

Климатические условия и широкое распространение массивных кристаллических пород в северной части бассейна обуславливают слабую механическую денудацию. Модуль выноса взвешенных веществ здесь изменяется в пределах 0.4—0.7 т км⁻²год⁻¹. В ландшафтах южной части бассейна, расположенных на мощной толще четвертичных отложений, модули выноса взвешенных наносов существенно выше и составляют 1.2—4.5 т км⁻²год⁻¹.

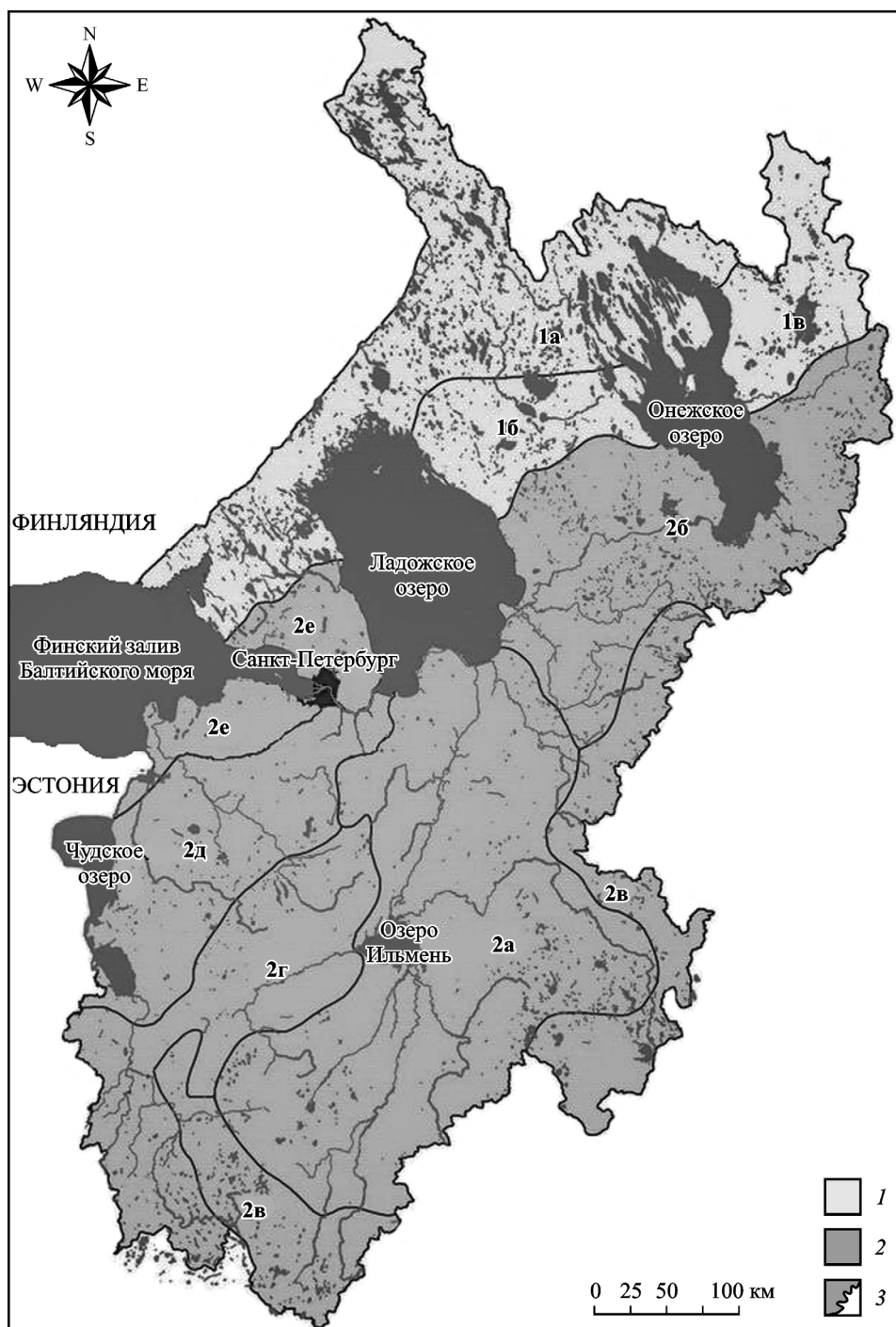


Рис. 1. Картохема районирования российской части водосбора Финского залива Балтийского моря по условиям формирования выноса биогенных элементов.

1 — Балтийский кристаллический щит, 2 — Русская равнина, 3 — граница водосбора [³, с. 16].

Таблица 1

**Модули выноса примесей для различных районов
русской части водосбора Финского залива**

Район (рис. 1)	P кг км ⁻² год ⁻¹	N кг км ⁻² год ⁻¹	$C_{орг}$ т км ⁻² год ⁻¹	BV т км ⁻² год ⁻¹	Mg кг км ⁻² год ⁻¹	Cu кг км ⁻² год ⁻¹	Fe кг км ⁻² год ⁻¹
1а	0.6—6.1	250—300	0.9—2.9	0.4—0.7	0.8—14.1	0.4—0.8	95—526
1б	8.0—0.6	330—550	4.3—5.0	0.4—0.7	0.8—14.1	0.4—0.8	95—526
1в	13.0—14.5	300—500	5.3—8.6	0.4—0.7	0.8—14.1	0.4—0.8	225—605
2а	5.5—8.2	240—400	3.9—4.4	0.8—1.2	1.0—3.5	0.3—0.8	39—239
2б	13.2—13.8	230—450	5.4—6.0	3.0—6.8	8.0—9.8	1.0—3.1	225—605
2в	2.2—2.5	160—300	2.0—2.2	1.6—3.6	~1.8	~0.8	—
2г	4.0—6.2	180—350	3.0—4.5	1.2—4.5	0.8—14.1	0.4—0.8	—
2д	5.5—6.5	300—450	4.5—6.0	1.2—4.5	0.8—14.1	0.4—0.8	—
2е	7.0—9.2	200—350	2.0—4.0	1.2—4.5	~14.1	~0.8	80—880

Содержание меди и марганца в почвах зависит как от литологического состава почвообразующих пород, так и от протекающих процессов почвообразования. Максимальные значения модулей выноса характерны для водосборов юго-восточной части частного водосбора Ладожского озера (1.0—3.1 кг Cu км⁻²год⁻¹ и 8.0—9.8 кг Mn км⁻²год⁻¹). Здесь широко распространены подзолы с иллювиально-железисто-гумусовым горизонтом на породах лтского механического состава. Минимальные значения выноса указанных металлов присущи водосбору р. Волхов (0.3—0.8 кг Cu км⁻²год⁻¹ и 1.0—3.5 кг Mn км⁻²год⁻¹), на котором широко развиты торфяно-подзолисто-глеевые почвы.

Вынос железа на территории бассейна Ладожского озера и Финского залива определяется прежде всего природными факторами. Различия выноса в отдельных районах связаны с расположением водосборов рек в области Балтийского щита или Русской равнины и обусловлены развитием болотного и глеевого процессов, геоморфологическими особенностями местности, степенью участия грунтовых вод различного происхождения в питании рек и болотных систем. Относительно низкий вынос железа (39—239 кг км⁻²год⁻¹) выявлен на водосборах оз. Ильмень и р. Волхов. По мере продвижения к побережью Финского залива значения модуля выноса возрастают и могут достигать более 800 кг км⁻²год⁻¹.

Разработанная картосхема районирования модулей выноса примесей с водосбора Финского залива Балтийского моря предназначена для расчета нагрузок природного происхождения не только на Финский залив, но и на другие водные объекты его водосбора.

Использование методов математического моделирования для решения задачи выявления фоновой нагрузки на Финский залив ограничено тем, что в настоящее время достаточно хорошо разработаны только модели выноса биогенных веществ с водосборов. В настоящей работе для количественной оценки природного выноса биогенных веществ с водосбора Финского залива использована детерминированная математическая модель биогенной нагрузки ILLM (Institute of Limnology Load Model), созданная в Институте озероведения РАН. Модель ориентирована на существующие ограниченные 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 в Северо-Западном регионе России. Модель учитывает вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование биогенной нагрузки на водосбор, позволяет рассчитывать вынос примесей с водосбора с учетом влияния гидрологических факторов и удержания биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью, а также принимает во внимание массообмен с атмосферой. Конечным итогом моделирования является количественная оценка биогенной нагрузки на водоем со стороны водосбора и отдельных ее составляющих. Шаг расчетов составляет 1 год, что объясняется именно такой дискретностью исходной информации по основным источникам биогенной нагрузки и требованиями ХЕЛКОМ к снижению среднегодовых значений нагрузки на Балтику [6, с. 10]. В рамках настоящего исследования выполнен ряд модификаций модели ILLM по сравнению с предшествующим вариантом [3, с. 31], заключающихся в следующем.

— Количественная оценка выноса биогенных веществ за пределы водосбора с собранным урожаем L_c [т год⁻¹] может выполняться тремя способами: 1) априорное задание значения L_c при наличии биогенного баланса водосбора, рассчитанного соответствующими региональными органами, 2) расчет при наличии осредненной информации о модуле выноса биогенных веществ для всей площади водосбора по формуле $L_c = \beta A_f$, где β — осредненный по площади модуль выноса биогенного вещества с растительной массой урожая [т км⁻²год⁻¹], A_f — площадь обрабатываемых участков водосбора [км²]. Модуль выноса в свою очередь рассчитывается по формуле $\beta = KU/10$, где K — вынос химического вещества с растительной массой урожая [кг ц⁻¹], U — урожайность сельскохозяйственных культур [ц га⁻¹год⁻¹]. Именно таким образом выполнялись расчеты в предыдущем варианте модели. 3) Детальный расчет с учетом неоднородности выращиваемых культур по формуле $L_c = \sum \beta_i A_{fi}$, где β_i — модуль выноса биогенного вещества с растительной массой конкретной i -й культуры [т км⁻²год⁻¹], A_{fi} — площадь, на которой эта культура выращивается [км²].

— Нагрузка на водосбор, сформированная в результате внесения органических удобрений L_{of} [т год⁻¹], может задаваться на основе данных государственной статистической отчетности с годовым осреднением. При отсутствии такой информации приближенная оценка нагрузки L_{of} выполняется по формуле $L_{of} = \left(\sum_i M_j k_{fj} N_j \right) / 1000$, где k_{fj} — коэффициент эмиссии $P_{общ}$ или $N_{общ}$

одним домашним животным j -го наименования [кг год⁻¹], N_j — количество домашних животных (или птицы). В расчетную формулу добавлен коэффициент M_j — вклад домашних животных j -го наименования в нагрузку на водосбор (изменяется от 0 до 1) при $M_j = 1$ все биогенные вещества, образовавшиеся на фермах или птицефабриках, тем или иным способом участвуют в формировании нагрузки. $M_j = 0$ означает полный вывод отходов животноводства или птицеводства из биогенного баланса водосбора.

— В формулу для расчета коэффициента удержания биогенных веществ гидрографической сетью водосбора R_r добавлен безразмерный калибровочный параметр k_{cal} : $R_r = k_{cal} \left(1 - \frac{1}{1 + aHL^b} \right)$, где HL — гидравлическая нагрузка

[м год⁻¹], a и b — безразмерные эмпирические параметры. Приведенная формула предложена и протестирована специалистами из Института пресноводной экологии и рыболовства (Германия). Введение калибровочного параметра позволит более адекватно учесть региональные условия формирования удержания биогенных веществ водосборами.

— Выполнено разделение точечных источников биогенной нагрузки на источники нагрузки на водосбор, которая затем участвует в процессе удержания, и источники, сбрасывающие сточные воды непосредственно в изучаемый водный объект. Таким образом, результирующая нагрузка на водоем L рассчитывается так: $L = (1 - R_r) L_{tot} + L_{direct}$, где L_{tot} — общая нагрузка на водосбор [т год⁻¹], L_{direct} — вклад прямых сбросов в формирование биогенной нагрузки на водный объект [т год⁻¹].

Схема модели представлена на рис. 2. Модель прошла верификацию на ряде экспериментальных объектов, расположенных на российской части водосбора Финского залива [4, с. 55], и успешно применяется для решения задач оценки выноса биогенных веществ с территорий, не охваченных системой мониторинга, и выбора путей возможного снижения нагрузки на морскую экосистему [1, с. 57]. По результатам выполнения проекта EU BaltHazAR II компонент 2.2 «Создание потенциала в рамках экологического мониторинга для получения данных загрязнения из различных источников, например для HELCOM PLCs» сделан вывод о том, что «модель ILLM может быть использована для приближенной оценки биогенной нагрузки на Балтийское море с неизученных и малоизученных водосборов России».

Для адекватной оценки фоновой нагрузки с помощью модели необходимо экспериментально установить содержание примеси в стоке с природных территорий, не подверженных антропогенным воздействиям. С этой целью зимой и весной 2013 г. проведена серия измерения концентраций $P_{общ}$ и $N_{общ}$ в ряде малых притоков Финского залива (реки Песчаная, Велийоки, Чулковка, Полевая, Дрема, Матросовка, Гороховка, Гладышевка, Черная, Лебяжье, Коваша, Воронка, Систа и Хаболовка) с площадью водосборов от 44.8 до 676 км². При этом залесенность водосборов составляла от 63.5 до 98.8 %, а площадь урбанизированных территорий, формирующих основную биогенную нагрузку, от 0 до 5 %. В результате обобщения полученных результатов выявлена зависимость концентрации $P_{общ}$ от площади урбанизированной территории, представленная на рис. 3. На основе полученных материалов в качестве фоновой концентрации в стоке принято значение 0.045 мг л⁻¹. Для азота не удалось выявить значимой зависимости содержания в стоке от типов подстилающей поверхности. Поэтому в качестве фоновой концентрации принято наименьшее из наблюдаемых значений — 0.7 мг л⁻¹.

С использованием ILLM выполнены расчеты биогенной нагрузки на Финский залив с российской части частного водосбора Финского залива (водосборы северных и южных малых притоков, р. Луга и частного водосбора р. Нева общей площадью 25 948 км²). Значения биогенной нагрузки на Финский залив с его частного водосбора, рассчитанные для среднего многолетнего стока с водосбора (нормы стока) в 300 мм год⁻¹, составляют 3105 т P год⁻¹ и 15 065 т N год⁻¹ (табл. 2).

Очевидна доминирующая роль рассредоточенных источников биогенной нагрузки, прежде всего потенциально возможной нагрузки от животноводства и птицеводства, составляющей 81 % для $P_{общ}$ и 65 % для $N_{общ}$ от значения суммарной нагрузки на водосбор. При этом следует помнить, что приведен-



Рис. 2. Схема расчета выноса биогенных веществ с водосбора и формирования внешней биогенной нагрузки на водоемы.

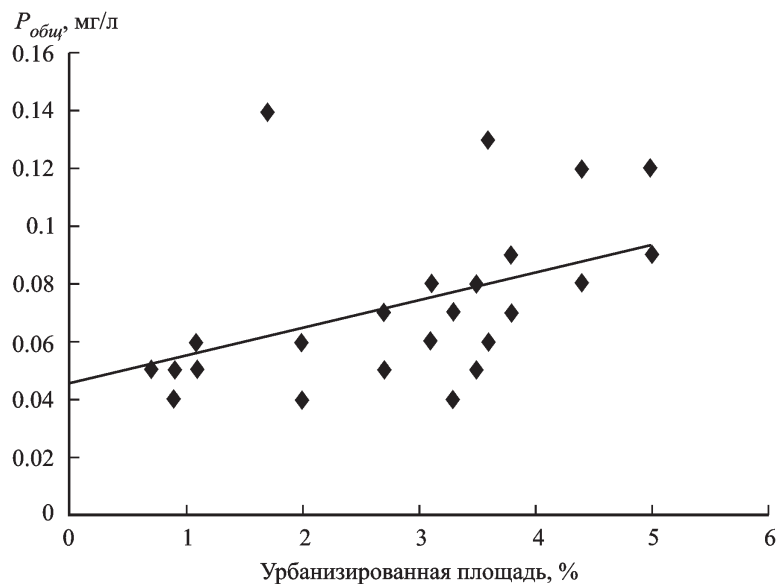


Рис. 3. Зависимость содержания $P_{общ}$ в стоке изучаемых рек в зависимости от урбанизации водосбора.

Таблица 2

**Основные компоненты биогенной нагрузки (т год⁻¹) на Финский залив
с частного водосбора (25 948 км²), рассчитанные для нормы стока (300 мм год⁻¹)**

Вещество	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$
Нагрузка от точечных источников на водосборе	212	1324
Рассредоточенная эмиссия подстилающей поверхностью	423	7207
Рассредоточенная нагрузка от внесения минеральных удобрений	633	3899
Рассредоточенная нагрузка от животноводства и птицеводства	5724	23371
Рассредоточенная нагрузка от атмосферных выпадений	84	0
Суммарная биогенная нагрузка на водосбор	7076	35801
Вынос с собранным урожаем	2223	15324
Удержание водосбором и гидрографической сетью	1748	5410
Вынос биогенных веществ с водосбора и нагрузка на Финский залив	3105	15067
В том числе природная составляющая	275	3669
Модуль выноса с водосбора (кг км ⁻² год ⁻¹)	120	581
Модуль фонового (природного) выноса с водосбора (кг км ⁻² год ⁻¹)	11	153

ные результаты моделирования являются верхней (максимальной) оценкой биогенной нагрузки на залив с частного водосбора, так как в расчетах использовано предположение о том, что все биогенные вещества, образовавшиеся на животноводческих фермах и птицефабриках водосборной территории, участвуют в формировании нагрузки. Реальная ситуация отличается от гипотетической, однако пока неизвестно насколько существенно. После сбора более подробной и достоверной информации о потоках биогенных веществ в пределах изучаемого водосбора сделанная количественная оценка должна быть уточнена.

Рассчитанные значения природной составляющей биогенной нагрузки на залив составляет 275 т P год⁻¹ и 3969 т N год⁻¹ или 11 кг P км⁻²год⁻¹ и 153 кг N км⁻²год⁻¹ (9 % для $P_{\text{общ}}$ и 26 % для $N_{\text{общ}}$ от значения суммарной нагрузки на Финский залив). Нетрудно видеть хорошее соответствие результатов модельных расчетов природного выноса фосфора и данных табл. 1. В то же время можно отметить некоторое занижение расчетных значений выноса азота по сравнению с материалами натурных исследований. Однако принимая во внимание приближенный характер выполненной оценки и естественно возникающие погрешности в задании параметров модели для достаточно крупного и неоднородного водосбора, можно признать полученный результат удовлетворительным.

Достоинством использованного метода оценки биогенной нагрузки на основе модели ILLM является возможность расчета природного выноса биогенных веществ с водосбора в зависимости от слоя стока. Анализ полученных результатов показывает, что увеличение стока приводит к увеличению эмиссии биогенных веществ из почв и к уменьшению удержания биогенных элементов гидрографической сетью водосбора. В результате природная биогенная нагрузка на Финский залив возрастает. Так, изменчивость слоя стока в интервале значений от 200 до 400 мм год⁻¹ приводит к изменчивости биогенной нагрузки до ± 20 —25 % относительно значений, соответствующих норме стока.

Таким образом, анализ представленных материалов позволяет сделать следующие выводы.

— Рассмотренные в настоящей работе методы оценки природной составляющей биогенной нагрузки на водные объекты со стороны водосбора, основанные на экспериментальных исследованиях и математическом моделировании, позволяют получать для изучаемой территории взаимодополняющие результаты, не противоречащие друг другу.

— Прогресс в деле совершенствования и детализации методов оценки фоновой биогенной нагрузки на Финский залив и водные объекты его бассейна связан прежде всего с дальнейшим сбором натурных данных о влиянии особенностей подстилающей поверхности на характеристики природного выноса химических веществ с водосборов.

Настоящее исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ, проект 12-05-00702-а.

Список литературы

- [1] Кондратьев С. А. Оценка биогенной нагрузки на Финский залив Балтийского моря с российской части водосбора // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 1. С. 56—64.
- [2] Кондратьев С. А., Алябина Г. А., Сорокин И. Н. Метод оценки природной составляющей внешней нагрузки органическим веществом и биогенными элементами на водоемы Северо-Запада России // География и природные ресурсы. 2010. № 4. С. 130—136.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). Helsinki, 2007. 80 p.
- [6] HELCOM Baltic Sea Action Plan — Helsinki Commission Publ., Helsinki, Finland, 2007. 103 p.

Санкт-Петербург
kondratyev@limno.org.ru
*ФГБУН Институт озерадения РАН
**Российский государственный
гидрометеорологический университет

Поступило в редакцию
26 февраля 2013 г.