

УДК 631.95

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

А.Ю. БРИУХАНОВ, канд. техн. наук.; С.А. КОНДРАТЬЕВ<sup>1</sup>, д-р физико-математических наук; Н.С. ОБЛОМКОВА; А.С. ОГЛУЗДИН, канд. биол. наук; И.А. СУББОТИН

<sup>1</sup>Институт Озероведения РАН, Санкт-Петербург

Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты, разработанная в отделе инженерной экологии сельскохозяйственного производства ИАЭП совместно с учеными Института Озероведения РАН, призвана решить первостепенную задачу определения вклада различных источников в поступление биогенных веществ с российской части водосборного бассейна Балтийского моря. Апробация разработанной методики в рамках моделирования поступления биогенных веществ с водотоком реки Луга показала удовлетворительное соответствие полученных величин с данными мониторинга Северо-Западного Управления Росгидромета на реке Луге, что говорит об адекватности результатов оценки вклада сельскохозяйственного производства с использованием предложенной методики. Особенностью методики является учет эффекта от внедрения наилучших доступных технологий утилизации навоза и прогнозных значений снижения поступления азота и фосфора в водные объекты российской части водосборного бассейна Балтийского моря. Результаты оценки диффузной нагрузки с применением разработанной методики были использованы в ходе анализа нагрузки биогенных веществ, сформированной на двух водохозяйственных участках (ВХУ), на водосборе р. Луги (ВХУ 01.03.00,005 - Луга от истока до водомерного поста Толмачево и ВХУ 01.03.00,006 - Луга от водомерного поста Толмачево до устья). В соответствии с результатами моделирования, проведенного для года средней водности, современная биогенная нагрузка на Финский залив со стороны водосбора р. Луги составляет по фосфору 266,0 т/год и по азоту 4141,1 т/год. Прогнозный расчет по вышеуказанным участкам показал, что при внедрении НДТ применение органических и минеральных удобрений, возможно, снизить поступление азота и фосфора в водные объекты рассматриваемых ВХУ на 523,1 т/год и 18,2 т/год, соответственно, что составляет в среднем 15,5% по азоту и 8,5% по фосфору.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственное производство; экология; диффузная нагрузка; водный объект; наилучшая доступная технология.

## CALCULATION METHOD OF AGRICULTURAL NUTRIENT LOAD ON WATER BODIES

A.Yu. BRIUKHANOV, Cand. Sc. (Eng); S.A.KONDRAVIEV<sup>1</sup>, DSc (Physics and Math);

N.S. OBLOMKOVA; A.S.OGLUZDIN, Cand. Sc. (Biol); I.A. SUBBOTIN

<sup>1</sup>Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg

The calculation technique of the biogenic load on the water bodies from the agricultural sources, which has been developed in the Department of Engineering Ecology of Agricultural Production in IEEP together with the researchers from the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, is designed to solve the primary problem of determining the contribution of different sources to the nutrient input from the Russian part of the Baltic Sea catchment area. Approbation of the developed technique in the

modelling of nutrient inputs with a stream of the Luga River showed satisfactory agreement between the values obtained with the monitoring data received by the North-West Administration of Federal Service of Russia on Hydrometeorology and Monitoring of the Environment (Roshydromet) on the Luga River, which indicates the adequacy of the evaluation results of the contribution of agricultural production using the proposed method. Specific feature of the technique is that it takes into account the effect of introduction of best available technologies (BAT) for utilization of manure and the predicted values of the reduction of nitrogen and phosphorus access in the bodies of the Russian part of the Baltic Sea catchment area. The assessment results of diffuse loads by applying the developed methods were used in the analysis of the loads of nutrients generated at the two water-resource areas located in the catchment of the Luga River (water-resource area 01.03.00,005 – the Luga River from the outlet to Tolmachevo and water-resource area 01.03.00,006 - the Luga River from Tolmachevo to the mouth). According to the modeling results for the average water year the current nutrients load on the Gulf of Finland from the Luga River catchment area is 266.0 t/year of phosphorus and 4141.1 t/year of nitrogen. The prediction calculations of the above water-resource areas showed that introduction of BAT of organic and mineral fertilizers application may reduce the nitrogen and phosphorous access to the water bodies of the above water-resource areas by 523.1 t/year and 18.2 t/year/ respectively, that makes 15.5% nitrogen and 8.5% phosphorous average for all water-resource areas.

**Key words:** agricultural production; ecology; diffuse load; water body; best available technique.

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное эвтрофирование морских вод – основное препятствие на пути достижения благополучного состояния экосистемы Балтийского моря. За последние 100 лет состояние Балтийского моря изменилось от олиготрофного с чистой водой до эвтрофной морской среды. Основной причиной интенсификации процессов эвтрофирования морских вод является увеличение поступления в морские воды азота и фосфора (биогенных веществ) от антропогенной деятельности на территории водосборного бассейна.

С момента своего образования ХЕЛКОМ, исполнительный орган Конвенции по защите морской среды региона Балтийского моря (Хельсинкская конвенция), предпринимает усилия по ограничению негативного воздействия от наземных источников, в том числе для снижения антропогенного эвтрофирования морских вод. С 2007 г. требования по снижению воздействия по приносу биогенных веществ в морскую среду от прибрежных стран приобрели количественное выражение в виде квот ХЕЛКОМ и были одобрены всеми государствами в составе Плана действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю (далее - ПДБМ ХЕЛКОМ). В основе системы квотирования лежит принцип распределения «избыточного» с точки зрения благоприятного состояния морской среды поступления биогенных веществ между странами исходя из соотношения их фактического вклада в формирование общей биогенной нагрузки на Балтийское море.

В 2013 г., по итогам пересмотра требований, установленных в ПДБМ ХЕЛКОМ, были утверждены обновленные значение квот. Квоты сокращения годовой величины биогенной нагрузки с российской части водосборного бассейна Балтийского моря составляют 10 380 т/год по азоту валовому и 3 790 т/год по фосфору валовому.

Выполнение требований, установленных квотой, предполагается путем реализации странами мероприятий по снижению привноса биогенных веществ от точечных и диффузных источников антропогенного происхождения.

Реализация мероприятий для достижения значений, установленных квотой, сопряжена со значительными финансовыми затратами. Поэтому, для определения приоритетных мер, необходимо установить перечень источников, оказывающих наибольший вклад в загрязнение биогенными веществами. Наличие достоверной оценки доли различных источников в формировании нагрузки - ключевое условие для разработки эффективных мероприятий в соответствии с требованиями ХЕЛКОМ. Следовательно, планирование эффективных мероприятий для выполнения Россией обязательств, установленных квотами ХЕЛКОМ, требует наличие методологии оценки вклада различных источников в формирование биогенной нагрузки с российской части водосборного бассейна Балтийского моря.

Анализ достаточности методической базы для оценки вклада источников в формирование биогенной нагрузки с российской территории [1], показал, что в настоящее время наиболее существенным препятствием для получения объективной картины распределения нагрузки по источникам является отсутствие официальной методики определения биогенной нагрузки от диффузных источников.

С учетом того, что превалирующую роль в формировании выноса от этой категории источников играют сельскохозяйственные земли [2, 3, 4, 5], в первую очередь требуется разработка методики определения биогенной нагрузки на водные объекты от сельскохозяйственного производства.

## **МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ**

Подходы к оценке общей биогенной нагрузки от страны, а также методы определения вклада различных источников в её формирование приведены в Руководстве ХЕЛКОМ по оценке нагрузки загрязняющих веществ на Балтийское море (далее – Руководство ХЕЛКОМ).

Однако, в отношении диффузных источников Руководство ХЕЛКОМ не содержит конкретных методик оценки воздействия от диффузных источников, а лишь определяет минимальный перечень факторов, которые должны учитываться при оценке вклада этих источников, в том числе сельскохозяйственного происхождения. К таким факторам можно отнести климатические характеристики, характер землепользования, тип почв и подстилающей поверхности, удаленность от водоприемника. Рекомендуется учитывать следующие пути поступления в водный объект биогенных веществ от диффузных источников:

- поверхность сток;
- эрозия;
- грунтовые воды;
- почвенные воды;
- дренажные воды;
- осаждение из атмосферы.

Анализ методик оценки нагрузки от сельскохозяйственных территорий, применяемых в странах-участницах ХЕЛКОМ, показал, что большинство из них основано на использовании моделей выноса биогенных веществ с сельскохозяйственных полей, таких как ICECREAM и SOILN (применяются в Швеции и Финляндии) [2]. Исходные данные для

расчета с использованием моделей характеризуют локальные параметры формирования нагрузки и включают характеристики возделываемых культур и используемых удобрений, сезонность сельскохозяйственных работ, погодные условия, типы почв. Результатами моделирования являются коэффициенты выноса (эмиссии), выраженные в кг/га и мг/л. Значения коэффициентов выноса для наиболее распространенных сочетаний параметров сельскохозяйственной деятельности уточняются на основе длительных наблюдений в замыкающих створах водосборов, подверженных существенному воздействию со стороны сельскохозяйственного производства.

Более простой подход, заключается в определении эмпирических уравнений расчета нагрузки от сельскохозяйственного производства, основанных на данных длительных исследований содержания биогенных веществ в первичных звеньях гидрографической сети сельскохозяйственных водосборов.

На основе отечественного и зарубежного опыта моделирования выноса биогенных веществ с водосборных территорий Институтом озероведения РАН - ИНОЗ РАН была разработана модель формирования биогенной нагрузки на водные объекты *ILM – Institute of Limnology Load Model* [6, 7, 8]. В рамках совместной работы с ИНОЗ РАН данная модель модифицирована с включением методики оценки биогенной нагрузки, сформированной сельхозпредприятиями и прогноза ее снижения при внедрении наилучших доступных технологий, разработанного в отделе инженерной экологии сельскохозяйственного производства ИАЭП [9, 10].

Согласно предложенной ИАЭП методики нагрузка, сформированная на полях сельхозпредприятий  $L_{agr}$  (т/год), рассчитывается по формуле:

$$L_{agr} = \sum_i A_i (M_{soil i} K_1 + (\alpha_1 M_{min i} + \alpha_2 M_{org i}) K_6) K_2 K_3 K_4 K_5 / 1000 ,$$

где  $M_{soil i}$ ,  $M_{min i}$  и  $M_{org i}$  – это содержание биогенного вещества в пахотном слое почвы, а также дозы внесения минеральных и органических удобрений на поля  $i$ -го сельхозпредприятия [кг/га];  $A_i$  - площадь угодий  $i$ -го сельхозпредприятия [га];  $\alpha_1$  – коэффициент, учитывающий усвоение минеральных удобрений сельхозкультурами;  $\alpha_2$  – коэффициент, учитывающий усвоение органических удобрений сельхозкультурами;  $K_1$  – коэффициент, характеризующий вынос биогенных веществ из пахотного слоя почв;  $K_2$  – коэффициент удалённости контура сельскохозяйственных угодий от гидрографической сети;  $K_3$  – коэффициент, характеризующий тип почв (по происхождению);  $K_4$  – коэффициент, характеризующий механический состав почв;  $K_5$  - коэффициент, учитывающий структуру сельхозугодий, т.е. соотношение площадей пашни, многолетних трав, лугов, пастбищ;  $K_6$  – коэффициент, учитывающий использование наилучших доступных технологий (НДТ) применения органических и минеральных удобрений. Коэффициенты для расчет указаны в табл.1. Значения коэффициентов определялись на основе комплексного анализа литературных источников и полученных ИАЭП экспериментальных данных с привязкой к территории российской водосборной части Балтийского моря, указанной на рис. 1 [9-15].

Таблица 1

Коэффициенты для расчета диффузной нагрузки

Коэффициент	N	P
$\alpha_1$	0,3	0,03
$\alpha_2$	0,1	0,02
$K_1$	0,03	0,008
$K_2$ (от 50 до 500м)	0,6	0,6
$K_3$ (от 500 до 2000м)	0,2	0,2
$K_4$ (более 2000м)	0,1	0,1
$K_5$ (дерново-подзолистые почвы)	1	1
$K_6$ (карбонатные почвы)	1,2	1,4
$K_7$ (торфянистые почвы)	0,8	1
$K_8$ (тяжелые глинистые и суглинистые почвы)	1	1
$K_9$ (легкие супесчаные и песчаные почвы)	1,8	2
$K_{10}$ (крупный рогатый скот)	0,46	0,37
$K_{11}$ (растениеводство)	0,88	0,76
$K_{12}$ (птицеводство)	0,46	0,37
$K_{13}$ (свиноводство)	0,46	0,37
$K_{14}$ (без НДТ)	1	1
$K_{15}$ (с использованием НДТ)	0,25	0,1

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчёт диффузной нагрузки азота, фосфора на водосбор при ведении сельскохозяйственной деятельности и потенциала ее снижения при использовании НДТ в сельском хозяйстве производился по семи водохозяйственных участках (ВХУ), формирующих нагрузку непосредственно на Финский залив и на реку Неву, расположение которых представлено на рис. 1. Определение исходных данных и выбор коэффициентов производился с учётом фактических данных по сельхозорганизациям и усредненным данным по крестьянско-фермерским и личным подсобным хозяйствам.

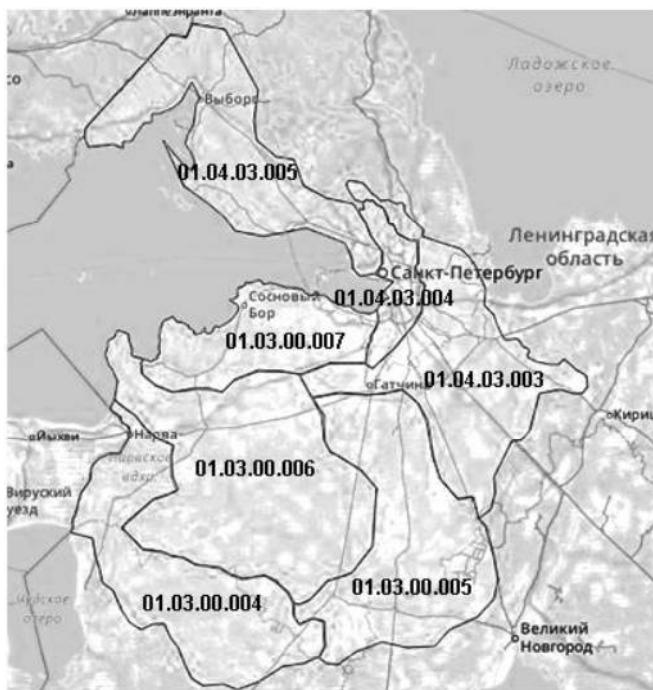


Рис. 1. Рассматриваемые водохозяйственные участки на водосборе Финского залива

В табл. 2 представлены обобщённые результаты расчета диффузной нагрузки азота, фосфора на водосбор и потенциал ее снижения при использовании НДТ в сельском хозяйстве.

Таблица 2  
Результаты расчёта диффузной нагрузки азота, фосфора на водосбор

BХУ	Факт Нагрузка азот общ (вал) т/год	Прогноз Нагрузка азот общ (вал) т/год	Факт Нагрузка фосфор общ (вал) т/год	Прогноз Нагрузка фосфор общ (вал) т/год	% Прогнозное снижения по азоту	% Прогнозное снижения по фосфору
01.03.00.004	436,0	381,0	34,3	31,7	12,6	7,6
01.03.00.005	1102	954	57,1	53,1	13,4	7,0
01.03.00.006	636,2	552,1	37,2	34,6	13,2	7,0
01.03.00.007	275	223	21,3	18,6	18,9	12,7
01.04.03.003	330	268	21,2	19,2	18,8	9,4
01.04.03.004	334	270	27,8	25,1	19,2	9,7
01.04.03.005	269	211	15,5	13,9	21,6	10,3
Итого	3382,2	2859,1	214,4	196,2	15,5	8,5

Результаты оценки диффузной нагрузки с применением разработанной методики были использованы в ходе анализа нагрузки биогенных веществ, сформированной на двух водохозяйственных участках, расположенных на водосборе р. Луги (BХУ 01.03.00.005 - Луга от истока до в/п Толмачево и BХУ 01.03.00.006 - Луга от в/п Толмачево до устья). Анализ выполнен путем математического моделирования формирования биогенной нагрузки на

водные объекты с применением модели ILLM, разработанной в Институте озероведения РАН.

В соответствии с результатами моделирования, проведенного для года средней водности (норма стока – 300 мм/год), современная биогенная нагрузка на Финский залив со стороны водосбора р. Луги составляет 266,0 т Р/год и 4141,1 т N/год. Сравнение результатов расчетов с данными мониторинга Северо-Западного Управления Росгидромета на реке Луге (створ г. Кингисепп) показывает их удовлетворительное соответствие.

Прогнозный расчет по вышеуказанным участкам показал, что при внедрении НДТ применения органических и минеральных удобрений возможно снизить поступление азота и фосфора в водные объекты рассматриваемых ВХУ на 523,1 т/год и 18,2 т/год соответственно, что составляет в среднем по всем ВХУ 15,5% по азоту и 8,5% по фосфору.

## ВЫВОДЫ

Методика определения биогенной нагрузки на водные объекты от сельскохозяйственного производства способствуют решению первостепенной задачи определения вклада различных источников в поступление биогенных веществ с российской части водосборного бассейна Балтийского моря.

Апробация предложенной методики в рамках моделирования поступления биогенных веществ с водотоком реки Луга показала удовлетворительное соответствие полученных величин с данными мониторинга Северо-Западного Управления Росгидромета на реке Луге, что говорит об адекватности результатов оценки вклада сельскохозяйственного производства с использованием предложенной методики.

С другой стороны, анализ подходов, применяемых в других странах Балтийского региона, показал, что использование расчетных методов подкрепляется результатами натурных измерений выноса биогенных веществ с сельскохозяйственных земель. В связи с этим, для повышения достоверности оценки с использованием предложенной методики необходимо провести детальные гидролого-гидрохимические исследования поступления биогенных веществ в водные объекты. Результаты исследования могут быть использованы для уточнения значений коэффициентов выноса, принятых в текущей версии методики на основе справочных данных.

Кроме того, в соответствии с Руководством ХЕЛКОМ следует также уточнить предложенный метод расчета, путем включения параметров учитывающих условия водности для рассматриваемого периода, а также параметров, необходимых для учета влияния эрозионных процессов и дренажных систем на поступление азота и фосфора в водный объект.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шведское агентство окружающей среды. Заключительный отчет по проекту РусНИП фаза II. Предложения по совершенствованию системы мониторинга и оценки нагрузки загрязняющих веществ на Балтийское море для целей Компиляции нагрузки загрязнений ХЕЛКОМ (HELCOM PLC): Отчет № 6646/Naturvårdsverket 2015 — Stockholm., 2015 — 155 с. — ISBN 978-91-620-6646-8;
2. HELCOM, 2011. The Fifth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-5), Balt. Sea Environ. Proc. No. 128

3. Попов В.Д., Максимов Д.А. Экологические проблемы использования машинных технологий в АПК // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2009. № 4. С. 5-8.
4. Афанасьев В.Н., Максимов Д.А., Афанасьев А.В. Концепция развития системы экологической безопасности сельхозпроизводства // Достижения науки и техники АПК. 2007. № 10. С. 40-42.
5. Хазанов Е.Е. Основные принципы создания экологически безопасных молочных ферм // В сборнике: Экология и сельскохозяйственная техника материалы 3-ей Научно-практической конференции. 2002. С. 248-254.
6. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 253 с.
7. 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
8. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Уличев В.И. Детерминировано-стохастическое моделирование стока и биогенной нагрузки на водные объекты (на примере Финского залива Балтийского моря). СПб, Изд. Нестор-История, 2013, 36 с.
9. Логико-лингвистическое моделирование для решения агроэкологических проблем / Брюханов А.Ю., Трифанов А.В., Спесивцев А.В., Субботин И.А. // Сборник докладов XIX Международной конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2016) 2016. С. 236-239.
10. Глобальный экологический кризис: мифы и реальность / Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Чичкова Е.Ф., Маркова Е.Г. // Общество. Среда. Развитие. 2016. № 1 (38). С. 92-99.
11. Справочник агрохимика / Д.А. Кореньков. — М.: Россельхозиздат, 1976. — 350 с.
12. Amberger A., Schweiger P. Wanderung der Pflanzennahrstoffe in Boden und deren Bedeutung in einer umweltbewussten Landwirtschaft. "Die Bodenkultur", 1973. № 24.
13. Barrows, H.L.; Kilmer, V.J. Plant nutrient losses from soil by water erosion. In: NORMANN, A.G. Advances in Agronomy, v.15, 1963.
14. Методические указания по расчету поступления биогенных элементов в водоемы от рассредоточенных нагрузок и установлению водоохраных мероприятий. Утверждены НТС Госагропрома РСФСР 17.02.88. Всесоюзное проектно-изыскательское и научно-исследовательское объединение «СОЮЗВОДПРОЕКТ»
15. Johnes, P.I.. and A. I. Heathwaite. 1997. Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments. Hydrological Processes, VOL. 11, 269-286 (1997).