



УДК 556

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПИЛОТНЫХ ВОДОСБОРАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ВОЛЖСКИЕ ВОДОХРАНИЛИЩА

**Кондратьев Сергей Алексеевич**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник

Институт озераедения РАН – обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН  
196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9

**Ясинский Сергей Владимирович**, д.г.н., главный научный сотрудник

Институт географии РАН  
119017, Москва, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4.

**Шмакова Марина Валентиновна**, д.г.н., ведущий научный сотрудник

Институт озераедения РАН – обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН  
196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9

**Кашутина Екатерина Александровна**, к.г.н., зав. лабораторией гидрологии

Институт географии РАН  
119017, Москва, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4.

**Расулова Анна Мурадовна**, к.ф.-м.н., научный сотрудник

Институт озераедения РАН – обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН  
196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9

---

*Работа выполнена за счет средств гранта РНФ 22-17-00224*

---

*Аннотация. В работе представлены результаты приближенной оценки биогенной нагрузки на левобережную и правобережную части Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ, сформированной на водосборной территории, по данным математического моделирования. Используются материалы наблюдений за формированием стока и выноса химических веществ на пилотных водосборах рек Линды, Кудьмы (Чебоксарское водохранилище), Казанки и Свяги (Куйбышевское водохранилище). Показано насколько существенно модуль выноса азота и фосфора ( $\text{кг}/\text{км}^2\text{год}$ ) зависит от среднего слоя стока с пилотных водосборов.*

*Ключевые слова: биогенная нагрузка, пилотные водосборы, математическая модель, Чебоксарское и Куйбышевское водохранилища.*

Антропогенное эвтрофирование – одна из проблем водохранилищ Волжского каскада [1]. Причиной служит интенсивная биогенная нагрузка антропогенного происхождения со стороны водосбора. При этом современная система мониторинга не позволяет выполнить адекватную оценку поступления азота и фосфора в водохранилища со стоком притоков ввиду малочисленности пунктов измерений расходов воды и гидрохимических характеристик. Целью работы является приближенная оценка биогенной нагрузки на Чебоксарское и Куйбышевское водохранилища, сформированной на водосборной территории, на основе имеющихся данных наблюдений за формированием стока и выноса химических веществ на пилотных водосборах с использованием метода математического моделирования.

Чебоксарское водохранилище образовано плотиной Чебоксарской ГЭС, расположенной в городе Новочебоксарске. Длина водохранилища — 341 км, площадь — 2190 км<sup>2</sup>, полный объем воды — 13.9 км<sup>3</sup>, площадь собственного водосбора без водосбора вышерасположенной Волги — 132.3 тыс. км<sup>2</sup>. Куйбышевское водохранилище создано в результате завершения строительства плотины Волжской ГЭС имени В.И. Ленина (ныне Жигулевская ГЭС). Длина водохранилища — 510 км, площадь — 6450 км<sup>2</sup> (крупнейшее в Евразии и третье в мире по площади), полный объем воды — 58 км<sup>3</sup>, площадь собственного водосбора без водосборов вышерасположенной Волги и Нижнекамского водохранилища — 132.3 тыс. км<sup>2</sup>. В качестве пилотных объектов, отражающих основные закономерности выноса биогенных элементов с водосборов указанных водохранилищ выбраны (рис. 1):

- Водосборы рек Линды (левый приток Волги, длина реки — 122 км, площадь водосборного бассейна — 1630 км<sup>2</sup>) и Кудьмы (правый приток Волги, длина — 144 км, площадь водосборного бассейна — 3220 км<sup>2</sup>) в бассейне Чебоксарского водохранилища.
- Водосборы рек Казанки (левый приток Волги, длина — 142 км, площадь водосборного бассейна — 2600 км<sup>2</sup>) и Свяги (правый приток Волги, длина — 375 км, площадь водосборного бассейна — 16 700 км<sup>2</sup>) в бассейне Куйбышевского водохранилища.

Основным инструментом достижения поставленной цели явилась математическая модель выноса биогенных элементов с водосбора и формирования биогенной нагрузки на водные объекты ILLM, разработана сотрудниками Института озераведения РАН (ИНОЗ РАН) и модифицированная при участии сотрудников Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) [2, 3]. Согласно принятой схеме расчета основными составляющими внешней нагрузки валовых (нефильтрованных) форм азота и фосфора на водный объект являются рассредоточенная эмиссия биогенных элементов подстилающей поверхностью, не подверженной в настоящее время сельскохозяйственному воздействию, нагрузка, сформированная в результате сельскохозяйственной деятельности, сбросы точечных источников загрязнения в гидрографическую сеть водосбора и непосредственно в водоем водоприемник, а также массообмен с атмосферой.

Эффективным средством расчета нагрузки, сформированной на полях сельхозпредприятий, является блок модели, предложенный специалистами ИАЭП, достоинством которого является расчет выноса биогенных элементов не только с учетом доз внесения удобрений и выноса азота и фосфора с урожаем, но и в зависимости от типов почв, слагающих сельскохозяйственный водосбор, их механического состава, удаленности поля от водного объекта. Кроме того, модель позволяет давать оценку снижения биогенной нагрузки при использовании наилучших доступных технологий ведения сельскохозяйственного производства. Модель работает с шагом по времени в 1 год. В материалах Хельсинкской комиссии [4] представлено описание моделей, которые могут использоваться для расчета внешней нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря. В их число входит и модель ILLM (рис. 2).

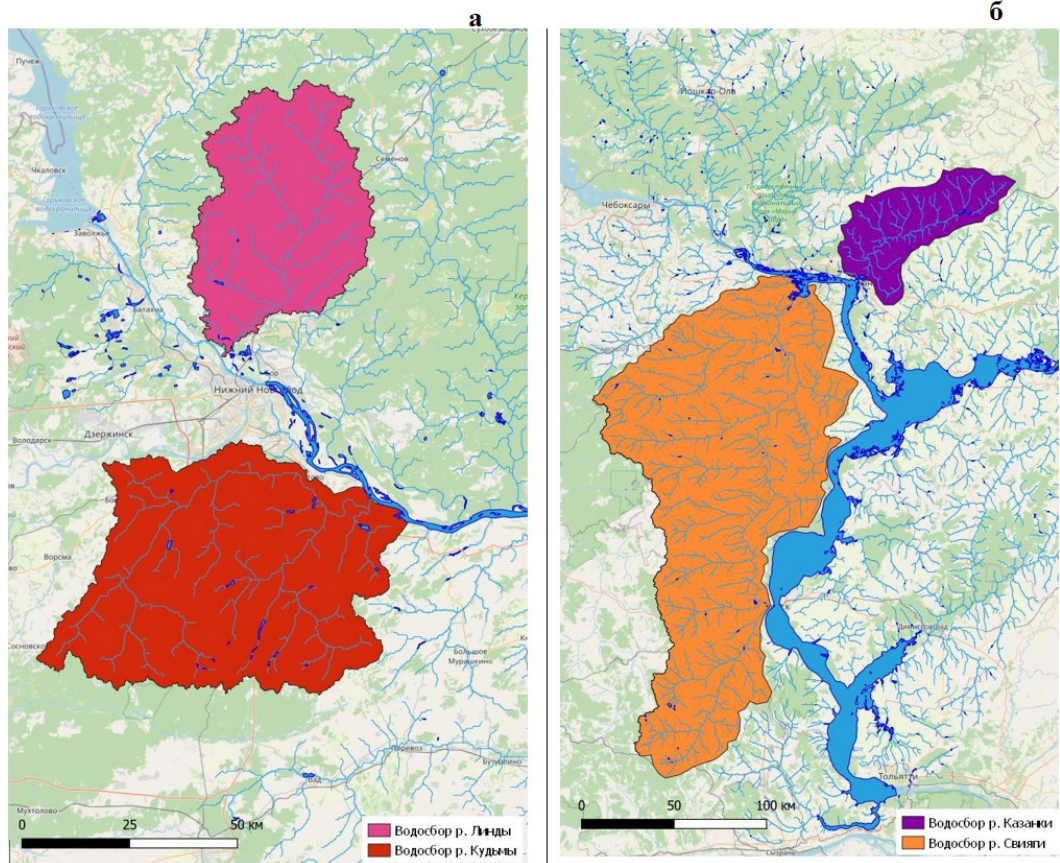


Рис.1. Схема расположения пилотных объектов на водосборах Чебоксарского (а) и Куйбышевского (б) водохранилищ.

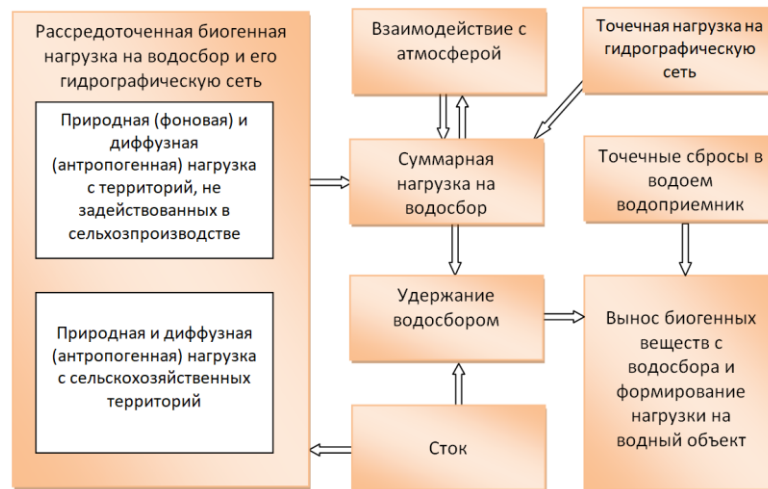


Рис.2. Блок-схема модели ILLM [2].

В качестве входной информации для выполнения расчетов необходимы сведения о различных типах подстилающей поверхности, формирующих рассредоточенный вынос биогенных элементов со стоком, интенсивности точечных источников, сбрасывающих стока в гидрографическую сеть водосбора, атмосферных выпадениях азота и фосфора, количестве домашних животных и птицы, а также внесенных минеральных и органических удобрений.

С целью информационного обеспечения модели проведена классификации типов подстилающих поверхностей водосбора. Дифференциация земного покрова производилась

за счет коллекций мультиспектральных спутниковых снимков. В данном исследовании использовалась коллекция Copernicus Global Land Service Collection 3 (CGLS-LC100) [5]. Коллекция CGLS-LC100 основана на спутниковых снимках PROBA-V, Sentinel-2, Landsat 7, 8. Для базовой классификации поверхности на здания и инфраструктуру, лес и гидрографическую сеть используется цифровая модель рельефа WorldDEM™, составленная по данным спутников TanDEM-X и TerraSAR-X. Пространственное разрешение коллекции данных CGLS-LC100 составляет 100 м.

Значения концентраций азота фосфора в стоке с различных типов подстилающей поверхности задавалось по данным полевых исследований, проводившихся в 2018 и 2019 годах сотрудниками Института озероведения РАН [3].

Для оценки вклада точечных источников в формирование биогенной нагрузки на озеро использовались данные статистических форм 2ТП(водхоз). Атмосферная нагрузка задавалась в соответствии с материалами исследований Казанского федерального университета [6]. Для калибровки модели использовались данные наблюдений за стоком и качеством воды на соответствующих постах государственного мониторинга Росгидромета за период с 2008 по настоящее время.

Сельскохозяйственная нагрузка азотом и фосфором на водосборы оценивалась по методике, представленной в работе [7]. Согласно этой методике в расчетах учитывались следующие основные факторы формирования биогенной нагрузки на сельскохозяйственных полях:

- содержание азота и фосфора в почве, доля их выноса от общего содержания в почве;
- количество азота и фосфора в составе минеральных удобрений и коэффициент их эмиссии;
- количество азота и фосфора в составе органических удобрений и коэффициент их эмиссии;
- удалённость контура сельскохозяйственных угодий от водных объектов;
- тип почв по происхождению;
- тип почв по механическому составу;
- структура сельхозугодий (отношение площадей пашни и многолетних трав, лугов, пастбищ, залежи).

Расчеты сельскохозяйственной нагрузки азотом и фосфором выполнялись только для пилотных водосборов. Для водосборов водохранилищ выполнялся пересчет значений нагрузки пропорционально соотношению площадей.

Результаты приближенной оценки биогенной нагрузки на Чебоксарское и Куйбышевское водохранилища, сделанной по данным моделирования выноса азота и фосфора с пилотных водосборов, представлены в Таблице 1. Из приведенных данных следует, что максимальный модуль выноса биогенных элементов ( $494 \text{ кгN/км}^2\text{год}$  и  $17.7 \text{ кгP/км}^2\text{год}$ ) характерен для левобережной части водосбора Куйбышевского водохранилища, имеющем максимальную концентрацию сельскохозяйственных предприятий и большую плотность населения, включая г. Казань. Минимальный модуль выноса общего фосфора ( $5.4 \text{ кгP/км}^2\text{год}$ ) отмечается на левобережной части водосбора Чебоксарского водохранилища, площадь которого на 54 % покрыта лесом. Можно отметить значительный разброс значений рассчитанной природной (фоновой) нагрузки. Сказанное в значительной степени объясняется существенной изменчивостью среднего слоя стока с пилотных водосборов — от  $74 \text{ мм/год}$  на правобережной части Куйбышевского водохранилища с минимальными значениями фонового выноса ( $567 \text{ тN/год}$  и  $22.3 \text{ тP/год}$ ), до  $188 \text{ мм/год}$  на левобережной части Чебоксарского водохранилища с максимальными значениями фонового выноса ( $4111 \text{ тN/год}$  и  $118 \text{ тP/год}$ ).

Представленные данные не противоречат результатам других исследований выноса биогенных элементов притоками Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ [3, 8]. При этом полученные в результате моделирования результаты необходимо сравнить с

регулярными данными наземного мониторинга стока, а именно качеством воды притоков водохранилищ.

Таблица 1

**Результаты приближенной оценки биогенной нагрузки на Чебоксарское и Куйбышевское водохранилища, сделанной по данным моделирования выноса азота и фосфора с пилотных водосборов**

Результаты расчета	N <sub>общ</sub>	P <sub>общ</sub>
Правобережье Чебоксарского водохранилища (площадь – 75510 км <sup>2</sup> , средний слой стока – 100 мм/год)		
Биогенная нагрузка на водохранилище (т/год)	16729	425
Природная (фоновая) составляющая (т/год)	2287	80,8
Модуль выноса (кг/км <sup>2</sup> год)	222	5,6
Левобережье Чебоксарского водохранилища (площадь – 55673 км <sup>2</sup> , средний слой стока 188 мм/год)		
Биогенная нагрузка на водохранилище (т/год)	14591	300
Природная (фоновая) составляющая (т/год)	4111	118
Модуль выноса (кг/км <sup>2</sup> год)	262	5,4
Правобережье Куйбышевского водохранилища (площадь – 30878 км <sup>2</sup> , средний слой стока – 74 мм/год)		
Биогенная нагрузка на водохранилище (т/год)	10836	468
Природная (фоновая) составляющая (т/год)	567	22,3
Модуль выноса (кг/км <sup>2</sup> год)	51	15,2
Левобережье Куйбышевского водохранилища (площадь – 60207 км <sup>2</sup> , средний слой стока – 125 мм/год)		
Биогенная нагрузка на водохранилище (т/год)	29723	1028
Природная (фоновая) составляющая (т/год)	2711	79,0
Модуль выноса (кг/км <sup>2</sup> год)	494	17,7

**Список литературы:**

1. Минеева Н. М., Семадени И. В., Макарова О. С. Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ р. Волги (2017–2018 гг.) // Биология внутренних вод. – 2020. – № 2. – С. 205–208.
2. Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор- водоток- водоем. – СПб: Нестор-История, 2019. – 246 с.
3. Поздняков Ш.Р., Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Игнатъева Н.В., Шмакова М.В., Минакова Е.А., Расулова А.М., Обломкова Н.С., Васильев Э.В., Терехов А.В. Перспективы сокращения выноса биогенных элементов с речных водосборов за счет внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) сельскохозяйственного производства (по результатам моделирования) // Водные ресурсы. – 2020. Т. 47(5). – С. 588–602.
4. Applied methodology for the PLC-6 assessment / Baltic Marine Environment Protection Commission. Ed. by Lars M. Svendsen, DCE Aarhus University, PLC-6 project manager. – Finland: HELCOM, 2019. – 59 p.
5. Buchhorn M., Lesiv M., Tsendbazar N.-E., Herold M., Bertels, L., Smets B. Copernicus Global Land Cover Layers-Collection 2. Remote Sensing 2020. – Vol. 108, 1044. doi:10.3390/rs12061044
6. Минакова Е. А., Шлычков А. П., Поздняков Ш. Р., Кондратьев С. А. Оценка величины выпадений биогенных веществ из атмосферы на частный водосбор Куйбышевского водохранилища в пределах Республики Татарстан // Проблемы региональной экологии. – 2019. – № 1. С. – 34–38.

7. Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Обломкова Н.С., Огуздин А.С., Субботин И.А. Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты. // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2016. – № 89. – С.175–183.
8. Ясинский С.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В., Нарыков А.Н. Антропогенная нагрузка и влияние водосбора на диффузный сток биогенных элементов в крупный водный объект (на примере водосбора Чебоксарского водохранилища) // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47(5). – С. 630–648.

## **THE USE OF OBSERVATIONS IN PILOT CATCHMENTS TO ASSESS THE BIOGENIC LOAD ON THE VOLGA RESERVOIRS**

Sergey A. Kondratyev, Sergey V. Yasinsky, Marina V. Shmakova,  
Ekaterina A. Kashutina, Anna M. Rasulova

*Abstract. The paper presents the results of an approximate assessment of the biogenic load on the left-bank and right-bank parts of the Cheboksary and Kuibyshev reservoirs formed in the catchment area, according to mathematical modeling. The materials of observations of the formation of runoff and removal of chemicals in the pilot catchments of the rivers Linda, Kudma (Cheboksary reservoir), Kazanka and Sviyaga (Kuibyshev reservoir) were used. It is shown how significantly the modulus of nitrogen and phosphorus removal (kg/km<sup>2</sup> year) depends on the average runoff layer from pilot catchments.*

*Keywords: biogenic load, pilot catchments, mathematical model, Cheboksary and Kuibyshev reservoirs.*