

Assessment of nutrient load on the Cheboksary Reservoir using the results of modeling runoff and removal of biogenic elements from the pilot catchments

Yasinskiy S.V.¹, Kondratyev S.A.², Shmakova M.V.², Kashutina E.A.¹, Rasulova A.M.^{2,*}

¹Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Staromonetny Lane, 29/4, Moscow, 119017, Russia

²Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, Sevastyanova, Str., 9, St. Petersburg, 196105, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results of an approximate assessment of the nutrient load on the Cheboksary reservoir of the Volga Cascade from the right-bank and left-bank parts of the catchment basin. The main solution tools are the recognition of the underlying surfaces in the catchment and mathematical modeling. The catchment basins of the Kudma (right-bank tributary) and Linda (left-bank tributary) rivers have been identified as pilot sites. The catchment basins of the Kudma (right-bank tributary) and Linda (left-bank tributary) rivers have been identified as pilot sites. The representativeness of the selected pilot sites for the catchment basins of the Cheboksary reservoir is demonstrated. The mathematical basis of the research was the “precipitation-runoff-removal” model describing the formation of runoff and removal of biogenic elements from the catchment basin. To calibrate the mathematical model, the materials of observations of water discharges and the content of chemical agents in the gauging sections of the pilot catchment basins were used. The modeling data provides an approximate estimate of the total nutrient load on the Cheboksary reservoir, as well as the contribution of natural nitrogen and phosphorus removal to the load from the catchment basin.

Keywords: Cheboksary reservoir, satellite image recognition, runoff, nutrient load, mathematical model

For citation: Yasinskiy S.V., Kondratyev S.A., Shmakova M.V., Kashutina E. A., Rasulova A.M. Assessment of nutrient load on the Cheboksary Reservoir using the results of modeling runoff and removal of biogenic elements from the pilot catchments // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 3. - P. 130-141. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-130

1. Introduction

Anthropogenic eutrophication is one of the significant issues in the Volga Cascade reservoirs (Mineeva et al., 2020). The reason is the intense anthropogenic nutrient load from the catchment basin. At the final stages of anthropogenic eutrophication in eutrophic and hypereutrophic water bodies, a disbalance may occur in the ratio of productive and destructive processes within the aquatic ecosystem. This leads to the emergence of oxygen-free (anaerobic) zones, fish kills phenomena, a reduction in fish stocks, and water pollution with toxic substances as a result of the development of certain species of phytoplankton, “blooming” the water (Rossolimo, 1977; Anthropogenic eutrophication..., 1982). At the same time, the current monitoring system is unable to provide an accurate assessment of the nitrogen and phosphorus inflow to the reservoirs from tributaries due to the limited number of measurement points for water discharge and hydrochemical characteristics.

The aim of the paper is to provide an approximate assessment of the loading of total nitrogen (N_{total}) and total phosphorus (P_{total}) on the Cheboksary reservoir formed in the catchment area, based on mathematical modeling using available observational data on the formation of runoff and removal of chemicals in pilot catchment basins.

The Cheboksary reservoir is formed on the Volga River by the Cheboksary hydroelectric plant, located in the city of Novocheboksarsk. The length of the reservoir is 341 km, the area is 2190 km², the total volume of water is 13.9 km³, the area of its own catchment basin without the upstream Volga basin is 131.9 thousand km². The Linda (left tributary of the Volga, its length is 122 km, its catchment area is 1682 km²) and the Kudma (right tributary of the Volga, its length is 144 km, its catchment area is 3248 km²) catchments in the basin of the Cheboksary reservoir were selected as pilot sites reflecting the main patterns of biogenic element removal on the basis of expert assessment (Fig.1).

*Corresponding author.

E-mail address: arasulova@limno.ru (A.M. Rasulova)

Received: May 26, 2024; Accepted: May 31, 2024;

Available online: June 19, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



The catchment basins are representative of the forested left bank and the agriculturally developed right bank of the Cheboksary reservoir. Moreover, karstic phenomena are widespread in the Kudma basin, which also influence the formation of runoff and the removal of nitrogen and phosphorus. There are gauging sections of state hydrological and hydrochemical monitoring of the Russian meteorological service in the selected rivers, which enables using these data for the calibration of mathematical models.

2. Research methods

At the initial stage of the study, the hypothesis concerning the suitability of the selected pilot catchments was tested. As is well-known, the removal of nutrients, namely nitrogen and phosphorus, from the catchment area is mainly determined by the structure of the underlying surface (Kondratyev and Shmakova, 2019; Khrisanov and Osipov, 1993). This applies to both natural (background) removal, which is formed in the parts of the catchment not affected by human impact (forest), and to anthropogenic removal (agricultural and urbanized areas). Therefore, the criterion for the correct selection of a pilot catchment is the similarity of their underlying surface structure with the structure of the basin as a whole.

In the present study, the differentiation of the land cover was carried out using global archives of satellite data of the underlying surfaces. The land cover classification of the Cheboksary reservoir basin and pilot catchments was based on the Copernicus Global Land Service Collection 3 (CGLS) (Buchhorn et al., 2021a; Buchhorn et al., 2020b). The CGLS collection is formed from satellite imagery from PROBA-V (PROBA-Vegetation) and Sentinel-2 with spatial resolutions of 100/110/300 m. The depth of the archives of satellite images used to create the CGLS data collection is from 2015-01-01 to 2020-12-31. The UN Land Cover Classification System (LCCS) was used to classify the land surfaces, which are in the CGLS archive. The main data source is PROBA-V multispectral satellite imagery with a temporal resolution of 5 days and a spatial resolution of 100 m of surface reflectivity at the Top-of-Canopy (TOC). The secondary data source is the daily PROBA-V multispectral satellite imagery with a spatial resolution of 300 m of surface reflectivity. Their median composite is made to archive regular 5-day images at 100-meter and 300-meter spatial resolution of the PROBA-V time series. This is necessary because the PROBA-V satellite provides daily global coverage for data with a spatial resolution of 300 m, which corresponds to 5-day coverage for the same data with a spatial resolution of 100 m. The identification of the types of underlying surfaces of the CGLS collection is based on spectral indices (Mousaei Sanjerehei, 2014), other global data archives (Pekel et al., 2016), and the WorldDEM™ digital elevation model. The detailed classification algorithm used to obtain the CGLS data collection is given in (Buchhorn et al., 2020a).

This study area includes 15 land cover classes that are necessary for calculating the load on a water

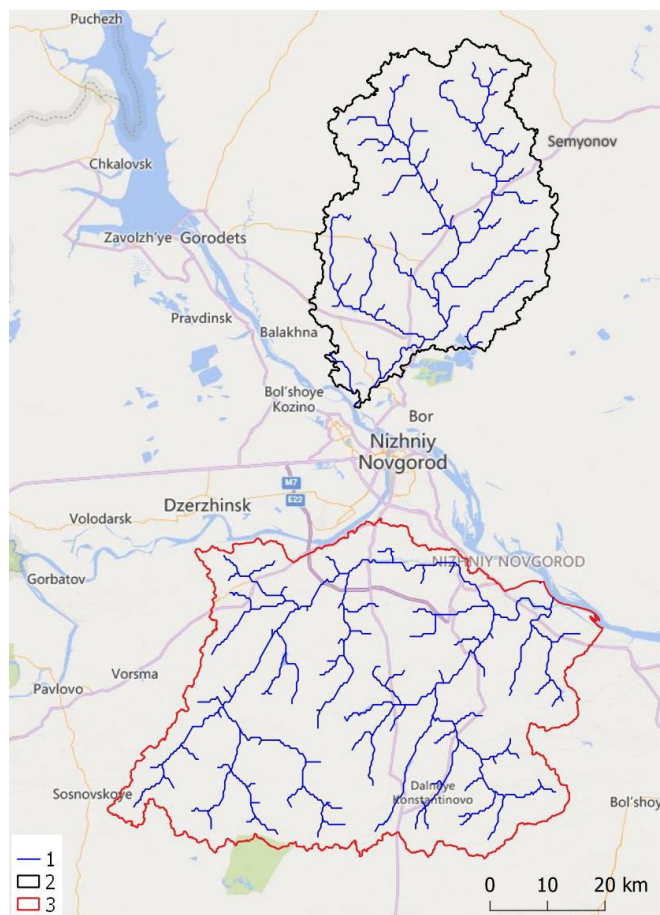


Fig.1. The location of the Kudma and Linda pilot catchments: 1 – hydrographic network, 2 – Linda River catchment, 3 – Kudma River catchment.

body (Table 1). The Table 1 demonstrates that the difference in the percentage of different surface classes of the pilot sites and the corresponding parts of the whole reservoir basin does not exceed 6%. The above correspondence of the land cover classes of the pilot catchments with the structure of the right- and left-bank parts of the Cheboksary reservoir basin confirms the legitimacy of the chosen objects as pilot ones. Besides, for the main classes of the underlying surface, based on the analysis of literature data (Rossolimo, 1977; Anthropogenic eutrophication..., 1982; Pozdnyakov et al., 2020), the emission characteristics of the intake of nutrients into the runoff are approximately estimated.

The main mechanisms for attaining the goal were a mathematical model of runoff formation of ILHM and a model of biogenic elements removal of ILLM developed at the Institute of Limnology RAS and modified with the participation of Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Agroengineering Center” (Kondratyev and Shmakova, 2019; Yasinskiy et al., 2020).

The runoff model, ILHM (Institute of Limnology Hydrological Model, Certificate of State Registration No. 2015614210) (Kondratyev and Shmakova, 2019), is designed for calculations of hydrographs of snowmelt and rainfall runoff from the catchment area, as well as water levels in the waterbody. The model has a conceptual base and describes the processes of snow accumulation and snowmelt, evaporation and soil moisture in the aeration zone, runoff formation, as well as runoff

Table 1. Comparison of land cover classes of the pilot catchments with the right- and left-bank parts of the Cheboksary reservoir basin

Land cover classes	Kudma River catchment, %	Right Bank, %	Linda River catchment, %	Left Bank, %
Shrubs	0.00	0.00	0.00	0.00
Herbaceous vegetation	10.49	16.38	3.18	2.94
Cultivated and managed vegetation / agriculture	37.96	37.00	11.96	8.85
Urban / built up	3.73	2.15	1.73	0.52
Bare/sparse vegetation	0.00	0.00	0.00	0.00
Permanent water bodies	0.24	0.72	0.07	1.19
Herbaceous wetland	0.01	0.07	0.01	0.06
Closed forest, evergreen needle leaf	1.88	4.03	10.49	12.23
Closed forest, deciduous broad leaf	23.00	23.28	33.07	37.78
Closed forest, mixed.	10.04	6.96	25.22	25.32
Closed forest that not matching any of the other definitions	1.45	1.63	1.71	3.61
Open forest, evergreen needle leaf	0.00	0.02	0.01	0.04
Open forest, deciduous broad leaf	0.20	0.05	0.53	0.44
Open forest, mixed	1.76	1.56	1.69	0.30
Open forest that does not correspond to any of the other definitions	9.22	6.15	10.33	6.72
Total catchment area, km ²	3248	75687	1682	56176

within a homogeneous catchment, the characteristics of which are assumed to be constant for the entire area. The model can function with a monthly time step and with an annual time step. During the simulation, the catchment is represented as a homogeneous simulated storage, accumulating incoming water and then gradually allowing it to flow way. The values of the basic parameters of the hydrological model, determining the shape of the hydrograph of the runoff, are determined depending on the percentage of water body, that is, as the ratio of the area of the water area to the overall area of the catchment. The model has been verified in a lot of catchments located in Russia (Tigoda, Lizhma, Syanga, Olonka, Sunah, Shuya, Ojat, Sjas, Vuoksa, Svir, Velikaya, Kazanka, Sviyaga, and Neva Rivers) and Finland (Mustajoki and Harajoki Rivers) (Kondratyev and Shmakova, 2019).

The model of nutrient removal, ILLM (Institute of Limnology Loading Model, Certificate of State Registration No. 2014612519), was developed based on existing modeling of runoff and the removal of biogenic elements from the catchment areas and nutrient inputs into the water bodies (Kondratyev and Shmakova, 2019; Behrendt and Dannowski, 2007; Behrendt and Opitz, 1999). The recommendations of the HELCOM for assessing the load on water bodies in the Baltic Sea were also built into the model (Guidelines..., 2015). The model is designed to solve problems associated with the quantification of nutrient loading formed by point and nonpoint sources of pollution and the forecast of its changes under the influence of possible anthropogenic and climatic changes. The model incorporates the existing capabilities of data input from the state moni-

toring system of water bodies as well as data from state statistical reporting on wastewater discharges and agricultural activities in the catchment areas. The model also allows the calculation of the removal of biogenic elements from the catchment under the influence of hydrological factors and retention by the catchment. The final result of the modeling is an evaluation of the nutrient load and its components on the received water body from the catchment. The model of nutrient load has been verified at several catchment basins in Russia (Velikaya, Luga, Mga, Izhora, Slavyanica, Sestra, Shuya, Vodla, Sunah, Kazanka, Sviyaga, and Irtysh Rivers) (Kondratyev and Shmakova, 2019; 80 years of limnological research..., 2023). The materials of the Helsinki Commission (Applied methodology..., 2019) describe models that can be used to calculate the external load on the water objects of the Baltic Sea basin. These include the ILLM model.

The combination of ILHM and ILLM models is a “precipitation-runoff-removal” model that transforms meteorological parameters (precipitation and air temperature) into runoff (water discharges) and the removal of biogenic elements from the catchment area, depending on the characteristics of the land cover classes and the intensity of external influences of a natural and anthropogenic nature. At the same time, the ILLM model provides for the calculation of natural (background) load. In accordance with the HELCOM definition (Guidelines..., 2015), the natural load of biogenic elements is formed due to their removal from non-cultivated lands and part of the removal from cultivated lands, which occurs independently of economic activity.

3. Results and Discussion

Inputs to the calculations require information on precipitation and air temperature, areas of various types of underlying surface forming a diffuse removal of nutrients, the intensity of point sources of nutrient loading, the atmospheric load of nitrogen and phosphorus, the number of animals and poultry in the catchment area, as well as applied mineral and organic fertilizers.

As noted earlier, in order to inform the model, a classification of the underlying surface types in the catchment was carried out. The values of phosphorus and nitrogen concentrations in runoff from various types of underlying surfaces were set according to field studies conducted in 2018 and 2019 by employees of the Institute of Limnology RAS (Pozdnyakov et al., 2020). To assess the contribution of point sources to the nutrient load on the lake, data from statistical forms of state reporting 2TP (vodkhoz) were used. Sufficiently high values of emission coefficients and concentrations in runoff from urbanized areas are an expression of the contribution of a dispersed rural population without connection to sewerage networks and treatment facilities (Behrendt and Opitz, 1999). The atmospheric load was set in accordance with the research materials of Kazan Federal University (Minakova et al., 2019), and no separation into natural and anthropogenic components was made. To calibrate the model, data from observations of runoff and water quality at the corresponding posts of the state monitoring of the Russian meteorological service in the closing reaches of the Kudma and Linda Rivers for the period from 2008 to the present were used.

The agricultural nitrogen and phosphorus loading on the catchments was estimated by the methodology presented in (Bryukhanov et al., 2016). According to this method, the following main factors in the formation of nutrient load on agricultural fields were taken into account in the calculations:

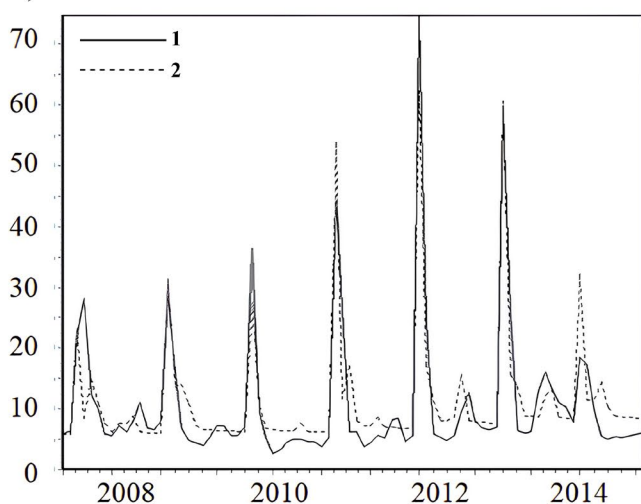
- content of nitrogen and phosphorus in the soil, the share of their removal from the total content in the soil;
- amount of nitrogen and phosphorus in the composition of mineral fertilizers and their emission coefficient;
- amount of nitrogen and phosphorus in the composition of organic fertilizers and their emission coefficient;
- distance of the contour of agricultural land from water objects;
- soil type by origin;
- soil type by mechanical composition;
- structure of farmland (ratio of arable land and perennial grasses, meadows, pastures, and deposits).

Calculations of the agricultural nitrogen and phosphorus load were performed only for pilot catchments. For the right- and left-bank parts of the reservoir catchment, the load values were recalculated in proportion to the area ratio.

The calibration of the “precipitation-runoff-removal” model on the pilot catchments of the Kudma and Linda rivers is presented below. Figure 2 shows the observed and calculated runoff from the catchments of the Linda River (gauge Vasilkovo) and Kudma River (gauge Kstovo). The Nash-Sutcliffe criterion is 78% for Linda and 67% for Kudma, which confirms the adequacy of the model for the described processes of runoff in the catchment area.

Table 2 shows the results of calibration of the ILLM model according to the correspondence of the average long-term values of the removal of biogenic elements with the runoff in the gauge-stations of the Kudma and Linda Rivers, which also confirms the correspondence of the simulation results to the available monitoring data.

a) Runoff, mm/month



b) Runoff, mm/month

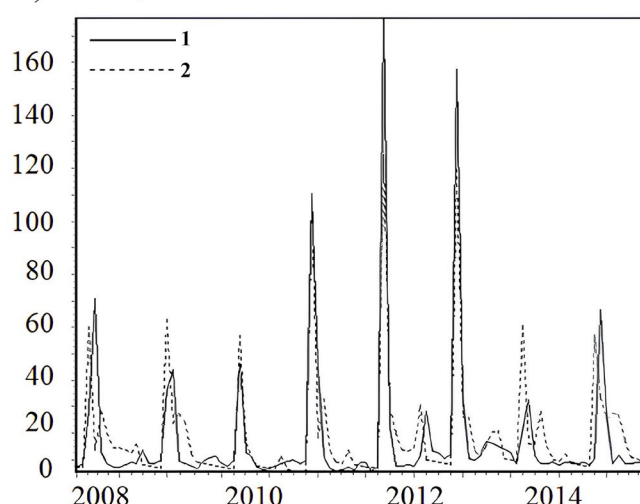


Fig.2. The observed (1) and calculated (2) average monthly runoff layers from the Kudma (a) and Linda (b) catchments.

When calculating the nitrogen and phosphorus removal from the right- and left-bank parts of the Cheboksary reservoir catchment, a model calibrated on the corresponding pilot catchments was used. As input information about the structure of the underlying surface of the reservoir catchment, data from the satellite image recognition mentioned above were used. The missing information on the sources of anthropogenic load was set based on the assumption that the load is proportional to the areas of the considered catchments exposed to anthropogenic impact. The results of an approximate assessment of the nutrient load on the Cheboksary reservoir based on data from modeling the runoff and nitrogen and phosphorus removal from pilot catchments are presented in Table 3.

According to the calculation results, the average long-term nutrient load on the Cheboksary reservoir is approximately estimated at 31320 tN/year and 725 tP/year. At the same time, the specific load from the right-bank part is 222 kg N/km² year and 5.6tP/km² year; from the left-bank part, it is 262 kg N/km² year and 5.4 tP/km² year. The presented modeling data do not contradict the results of other studies on nutrient removal by tributaries of the reservoir (Yasinskiy et al., 2020).

4. Conclusion

Thus, an approximate assessment of the nutrient load on a large water body from a catchment area that is not sufficiently sanctified by monitoring observations is possible under the following conditions:

- A reasonably well-studied analogue pilot catchment has been identified that has a point of hydrological and hydrochemical measurements at the trailing gauge-station and a similar land surface structure to the main catchment (e.g. % area of the main land surface classes);
- The selected mathematical model “precipitation - runoff – removal” is provided with information on the main sources of nutrient load on the hydrographic network and is calibrated for the closing gauge of the pilot catchment.

In this case, the lack of information on the sources of anthropogenic load on the whole catchment in the calculations can be compensated by data on the pilot site. In this case, the assumption of proportionality of catchment area parameters is made.

At the same time, it should be remembered that in future studies, in order to increase the degree of reliability, the modeling results should be compared with regular ground-based monitoring of runoff and water quality, which should be carried out on the main tributaries of the reservoir.

Acknowledgements

The paper was supported by the grant of the Russian National Science Foundation No. 22-17-00224 “Formation of hydrological and geochemical processes in the catchments of the cascades of the Upper Volga and Kama reservoirs under various scenarios of land use and climate change in their territories”.

Table 2. The results of the model calibration in the Kudma (a) and Linda (b) catchments according to the annual nitrogen and phosphorus removal in the closing gauge-stations

Source of information	Kudma – gauge Kstovo		Linda – gauge Vasilkovo	
	N _{tot} , t/year	P _{tot} , t/year	N _{tot} , t/year	P _{tot} , t/year
Average annual values (according to monitoring data)	715.69	18.00	443.73	9.16
Calibration results	717	18.00	442	9.11

Table 3. The results of an approximate assessment of the nutrient load on the Cheboksary reservoir, based on nitrogen and phosphorus removal modeling for the pilot catchments

Calculation results	N _{total}	P _{total}
Right bank of the Cheboksary reservoir (area – 75,687 km ² , average long-term runoff – 100 mm/year)		
Nutrient load on the reservoir (t/year)	16729	425
Natural (background) component (t/year)	2287	80.8
Removal module (kg/km ² year)	222	5.6
Left bank of the Cheboksary reservoir (area – 56176 km ² , average long-term runoff – 188 mm/year)		
Nutrient load on the reservoir (t/year)	14591	300
Natural (background) component (t/year)	4111	118
Removal module (kg/km ² year)	262	5.4

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- 80 years of limnological research at Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences. 2023. In: Kondratyev S.A. (Ed.). Moscow: Russian Academy of Sciences. DOI: [10.12731/978-5-907645-12-7](https://doi.org/10.12731/978-5-907645-12-7) (in Russian)
- Anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga. 1982. In: Petrova N.A. (ed.). Leningrad: Nauka. (in Russian)
- Applied methodology for the PLC-6 assessment, Baltic Marine Environment Protection Commission. 2019. HELCOM, Helsinki.
- Behrendt H., Dannowski R. 2007. Nutrients and heavy metals in the Odra River system. Berlin: Weissensee Verlag Publ.
- Behrendt H., Opitz D. 1999. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load. *Hydrobiologia* 410: 111–122.
- Bryukhanov A.Yu., Kondratyev S.A., Oblomkova N.S. et al. 2016. Methodology for determining the nutrient load of agricultural production on water bodies. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* [Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products] 89: 175–183. (in Russian)
- Buchhorn M., Bertels L., Smets B. et al. 2020. Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: version 3 Globe 2015-2019: Algorithm Theoretical Basis Document. Zenodo. Dataset v3.0. DOI: [10.5281/zenodo.3938968](https://doi.org/10.5281/zenodo.3938968)

Buchhorn M., Lesiv M., Tsendbazar N.-E. 2020. Copernicus Global Land Cover Layers – Collection 2. Remote Sensing 12(108): 1044. DOI:[10.3390/rs12061044](https://doi.org/10.3390/rs12061044)

Guidelines for the annual and periodical compilation and reporting of waterborne pollution inputs to the Baltic Sea (PLC-Water). 2015. In: Svendsen L.M. (ed.). Helsinki: HELCOM Publ.

Khrisanov N.I., Osipov G.K. 1993. Management of eutrophication of water bodies. St. Petersburg: Gidrometeoizdat. (in Russian)

Kondratyev S.A., Shmakova M.V. 2019. Mathematical modeling of mass transfer in the watershed-watercourse-reservoir system. St. Petersburg: Nestor-Istoriya. (in Russian)

Minakova E.A., Shlychkov A.P., Pozdnyakov Sh.R. et al. 2019. Assessment of the amount of nutrient deposition from the atmosphere in a private catchment of the Kuibyshev reservoir within the Republic of Tatarstan. Problemy regional'noj ekologii [Problems of regional ecology] 1: 34–38. (in Russian)

Mineeva N.M., Semadeni I.V., Makarova O.S. 2020. Chlorophyll content and current trophic state of the river reservoirs. Volga (2017–2018). Biologiya vnutrennikh vod [Biology of inland waters] 2: 205–208. (in Russian)

Mousaei Sanjerehei M. 2014. Assessment of spectral vegetation indices for estimating vegetation cover in arid and semiarid shrublands. Range Management and Agroforestry 35(1): 91-100.

Pekel J., Cottam A., Gorelick N. et al. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature 540: 418-422.

Pozdnyakov Sh.R., Bryukhanov A.Yu., Kondratyev S.A. et al. 2020. Perspectives of the Reduction of Nutrient Export from River Watersheds through the Introduction of Best Available Technologies for Agricultural Production: Based on Modeling Results. Water Resources 47(5): 771-784.

Rossolimo L.L. 1977. Changes in limnic ecosystems under the influence of anthropogenic factors. Moscow: Nauka. (in Russian)

Yasinskiy S.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V. et al. 2020. Anthropogenic Load and the Effect of Drainage Area on the Diffuse Runoff of Nutrients into a Large Water Body: Case Study of the Cheboksary Reservoir. Water Resources 47(5): 810–827.

Оценка биогенной нагрузки на Чебоксарское водохранилище по результатам моделирования стока и выноса биогенных элементов с пилотных водосборов



Ясинский С.В.¹, Кондратьев С.А.², Шмакова М.В.², Кашутина Е.А.¹, Расулова А.М.^{2,*}

¹Институт географии Российской академии наук, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4., Москва, 119017, Россия

²Институт озерадения РАН – обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, ул. Севастьянова, д. 9, Санкт-Петербург, 196105, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены результаты приближенной оценки биогенной нагрузки на Чебоксарское водохранилище Волжского каскада с правобережной и левобережной частей водосборной территории. Основные инструменты решения задачи – дешифрирование подстилающих поверхностей на водосборе и математическое моделирование. В качестве пилотных объектов определены водосборы рек Кудьмы (правобережный приток) и Линды (левобережный приток). Показана репрезентативность выбора указанных пилотных объектов для водосбора Чебоксарского водохранилища. Математическую основу исследования составила модель «осадки-сток-вынос», описывающая формирование стока и вынос биогенных элементов с водосбора. Для калибровки математической модели использованы материалы наблюдений за расходами воды и содержанием химических веществ в замыкающих створах пилотных водосборов. По данным моделирования дана приближенная оценка суммарной биогенной нагрузки на Чебоксарское водохранилище, а также вклада природного выноса азота и фосфора в нагрузку со стороны водосбора.

Ключевые слова: Чебоксарское водохранилище, дешифрирование спутниковых снимков, сток, биогенная нагрузка, математическая модель

Для цитирования: Ясинский С.В., Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Кашутина Е.А., Расулова А.М. Оценка биогенной нагрузки на Чебоксарское водохранилище по результатам моделирования стока и выноса биогенных элементов с пилотных водосборов // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 3. - С. 130-141. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-130

1. Введение

Антропогенное эвтрофирование – одна из проблем водохранилищ Волжского каскада (Минева и др., 2020). Причиной служит интенсивная биогенная нагрузка антропогенного происхождения со стороны водосбора. На завершающих стадиях развития процесса антропогенного эвтрофирования в эвтрофных и гиперэвтрофных водных объектах возможно возникновение дисбаланса в соотношении продукционно-деструкционных процессов в водной экосистеме, что приводит к возникновению бескислородных (анаэробных) зон и заморных явлений, уменьшению рыбных запасов, а также загрязнению воды токсичными веществами в результате развития определенных видов фитопланктона - «цветения» воды (Россолимо, 1977; Антропогенное эвтрофирование..., 1982). 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 нагрузки общим азотом ($N_{\text{общ}}$) и общим фосфором ($P_{\text{общ}}$) на Чебоксарское водохранилище, сформированной на водосборной территории, на основе математического моделирования с использованием имеющихся данных наблюдений за формированием стока и выноса химических веществ на пилотных водосборах.

Чебоксарское водохранилище образовано на реке Волге плотиной Чебоксарской ГЭС, расположенной в городе Новочебоксарске. Длина водохранилища — 341 км, площадь — 2190 км², полный объем воды — 13.9 км³, площадь собственного

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: arasulova@limno.ru (А.М. Расулова)

Поступила: 26 мая 2024; Принята: 31 мая 2024;

Опубликована online: 19 июня 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



водосбора без водосбора вышерасположенной Волги — 131.9 тыс. км². В качестве пилотных объектов, отражающих основные закономерности выноса биогенных элементов с правобережной и левобережной частей водохранилища на основе экспертной оценки, выбраны водосборы рек Линды (левый приток Волги, длина реки — 122 км, площадь водосборного бассейна — 1682 км²) и Кудьмы (правый приток Волги, длина — 144 км, площадь водосборного бассейна — 3248 км²) в бассейне Чебоксарского водохранилища (Рис.1). Водосборы репрезентативны для лесного левобережья и сельскохозяйственно освоенного правобережья Чебоксарского водохранилища. При этом в бассейне Кудьмы распространены карстовые явления, что также сказывается на формировании стока и выноса азота и фосфора. В замыкающих створах выбранных рек имеются пункты государственного гидрологического и гидрохимического мониторинга Росгидромета, что позволяет использовать эти данные для калибровки математических моделей.

2. Методы исследования

На первом этапе исследования была проведена гипотеза об адекватности выбора пилотных водосборов. Как известно вынос биогенных элементов (азота и фосфора) с водосборной территории определяется главным образом структурой подстилающей поверхности (Кондратьев и Шмакова, 2019; Хрисанов и Осипов, 1993). Сказанное относится как к природному (фоновому) выносу, который формируется на не затронутых хозяйственным воздействием частях водосбора (лес), так и к антропогенному выносу (сельскохозяйственные и урбанизированные территории). Поэтому критерием правильности выбора пилотных водосборов является схожесть их структуры подстилающей поверхности со структурой исследуемого водосбора в целом.

В настоящем исследовании дифференциация земного покрова производилась с помощью глобальных архивов спутниковых данных подстилающих поверхностей. Классификация земного покрова водосбора Чебоксарского водохранилища и пилотных водосборов строилась на основе коллекции Copernicus Global Land Service Collection 3 (CGLS) (Buchhorn et al., 2020a; Buchhorn et al., 2020b). Коллекция CGLS сформирована из снимков со спутников PROBA-V (PROBA-Vegetation) и Sentinel-2 с пространственными разрешениями 100 / 110 / 300 м. Глубина архива спутниковых снимков, используемых при создании коллекции данных CGLS, с 2015-01-01 по 2020-12-31. В качестве классификации подстилающих поверхностей архива CGLS использована Система классификации земного покрова ООН (Land Cover Classification System – LCCS). Основным источником данных являются многоспектральные спутниковые снимки PROBA-V с шагом 5 дней и пространственным разрешением 100 м отражательной способности поверхности на верхней границе растительного покрова (Top Of

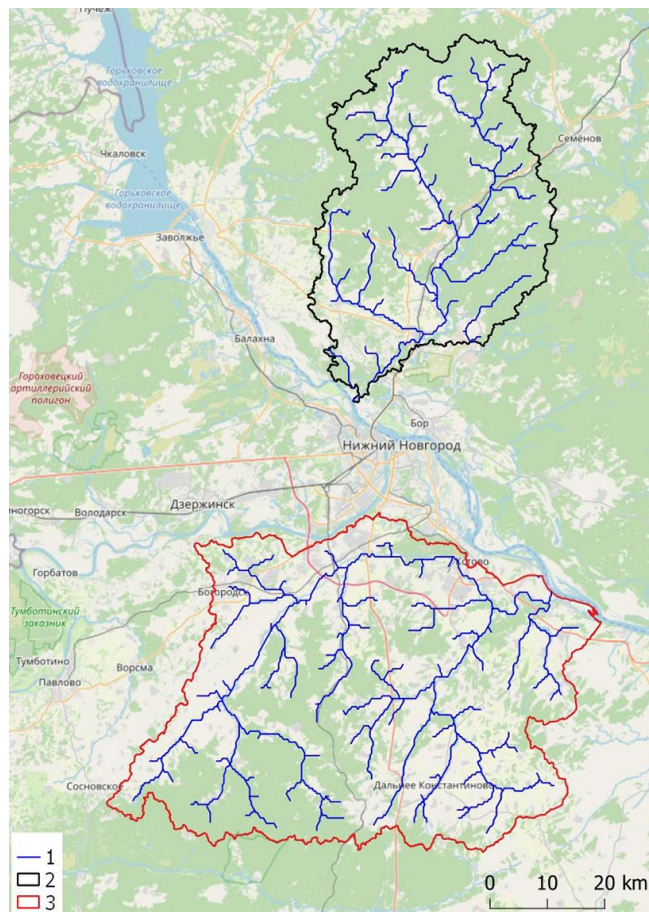


Рис.1. Схема расположения пилотных водосборов рек Кудьмы и Линды: 1 – гидрографическая сеть, 2 – водосбор р. Линды, 3 – водосбор р. Кудьмы.

Canopy, TOC). Вторичным источником данных являются ежедневные многоспектральные спутниковые снимки PROBA-V с пространственным разрешением 300 м отражательной способности поверхности. Их медианный композит делается для архивирования регулярных 5-дневных временных шагов в 100-метровом и 300-метровом пространственном разрешении временного ряда PROBA-V. Это необходимо, поскольку спутник PROBA-V обеспечивает ежедневный глобальный охват для данных с пространственным разрешением 300 м, что соответствует 5-дневному охвату для тех же данных с пространственным разрешением 100 м. Идентификация типов подстилающих поверхностей коллекции CGLS основана на спектральных индексах (Mousaei Sanjerehei, 2014) и других глобальных архивов данных (Pekel et al., 2016) и цифровой модели рельефа WorldDEM™. Подробный алгоритм классификации, использованный для получения коллекции данных CGLS приведен в (Buchhorn et al., 2020a).

На исследуемой территории выделяется 15 классов необходимых для расчета нагрузки на водный объект (Таблица 1). Как следует из представленной таблицы разница в процентном соотношении различных классов поверхности пилотных объектов и соответствующих частей всего водосбора водохранилища не превосходит 6%. Приведенное соответствие структуры подстилающей поверхности пилотных водосборов со структурой правобережной

Таблица 1. Сравнение структуры подстилающей поверхности пилотных водосборов с правобережной и левобережной частями водосбора Чебоксарского водохранилища.

Класс подстилающей поверхности	Водосбор р. Кудьмы, %	Правобережье, %	Водосбор р. Линды, %	Левобережье, %
Кустарники	0.00	0.00	0.00	0.00
Травянистая растительность.	10.49	16.38	3.18	2.94
Возделываемая растительность / сельское хозяйство	37.96	37.00	11.96	8.85
Городской/застроенный	3.73	2.15	1.73	0.52
Голая/редкая растительность	0.00	0.00	0.00	0.00
Постоянные водоемы	0.24	0.72	0.07	1.19
Травянистое болото	0.01	0.07	0.01	0.06
Сомкнутый лес, вечнозеленый игольчатый лист	1.88	4.03	10.49	12.23
Сомкнутый лес, лиственный широколиственный	23.00	23.28	33.07	37.78
Сомкнутый лес, смешанный.	10.04	6.96	25.22	25.32
Закрытый лес, не соответствующий ни одному из других определений	1.45	1.63	1.71	3.61
Открытый лес, вечнозеленый игольчатый лист	0.00	0.02	0.01	0.04
Редкий лес, листопадный широколиственный	0.20	0.05	0.53	0.44
Редкий лес, смешанный	1.76	1.56	1.69	0.30
Открытый лес, не соответствующий ни одному из других определений	9.22	6.15	10.33	6.72
Общая площадь водосборов, км ²	3248	75687	1682	56176

и левобережной частей водосбора Чебоксарского водохранилища подтверждает правомерность выбора указанных объектов в качестве пилотных. Кроме того, для основных классов подстилающей поверхности на основе анализа литературных данных (Россолимо, 1977; Антропогенное эвтрофирование..., 1982; Поздняков и др., 2020) приближенно оценены эмиссионные характеристики поступления биогенных элементов в сток.

Основными инструментами достижения поставленной цели явились математическая модель формирования стока с водосбора ИЛМ и модель выноса биогенных элементов с водосбора и формирования биогенной нагрузки на водные объекты. ILLM, разработанные сотрудниками Института озераведения РАН и модифицированные при участии сотрудников Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (Кондратьев и Шмакова, 2019; Ясинский и др., 2020).

Модель стока – ИЛМ (Institute of Limnology Hydrological Model, Свидетельство о государственной регистрации № 2015614210) (Кондратьев и Шмакова, 2019) предназначена для расчета гидрографов талого и дождевого стока с водосбора, а также уровня воды в водоеме. Модель имеет концептуальную основу и описывает процессы снеготаяния и снеготаяния, испарения и увлажнения

почвы в зоне аэрации, формирования стока, а также стока в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей территории. Модель может работать как с месячным шагом, так и с годовым шагом. В ходе моделирования водосборный бассейн представляется как однородное моделируемое хранилище, накапливающее поступающую воду, а затем постепенно позволяющее ей стекать. Значения основных параметров гидрологической модели, определяющих форму гидрографа стока, определяются в зависимости от процентного содержания водного объекта, то есть как отношение площади акватории к общей площади водосбора. Модель апробирована на ряде водосборов, расположенных в России (реки Тигода, Лижма, Сянга, Олонка, Суна, Шуя, Оять, Сясь, Вуокса, Свирь, Великая, Казанка, Свяга и Нева) и Финляндии (реки Мустайоки и Харайоки) (Кондратьев и Шмакова, 2019).

Модель биогенной нагрузки – ILLM (Institute of Limnology Load Model, Свидетельство о государственной регистрации № 2014612519) разработана на основе существующих моделей стока и выноса биогенных веществ с водосборных площадей и их поступления в водоемы (Кондратьев и Шмакова, 2019; Behrendt and Dannowski, 2007; Behrendt and Opitz, 1999). В модель также были заложены рекомендации ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные

объекты Балтийского моря (Guidelines..., 2015). Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой биогенной нагрузки, формируемой точечными и неточечными источниками загрязнения, и прогнозом ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений. В модели реализованы существующие возможности ввода данных государственной системы мониторинга водных объектов, а также материалов государственной статистической отчетности о сбросах сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборных бассейнах. Модель также позволяет рассчитывать вынос биогенных веществ из водосбора под влиянием гидрологических факторов и удерживание водосбором. Конечным результатом моделирования является оценка биогенной нагрузки и ее компонентов на поступающий водоем с водосбора. Модель нагрузки биогенными веществами проверена на ряде водосборов России (реки Великая, Луга, Мга, Ижора, Славянка, Сестра, Шуя, Водла, Суна, Казанка, Свяга и Иртыш) (Кондратьев и Шмакова, 2019; 80 лет развития лимнологии..., 2023). В материалах Хельсинкской комиссии (Applied methodology..., 2019) представлено описание моделей, которые могут использоваться для расчета внешней нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря. В их число входит и модель ILLM.

Совокупность моделей ILLM и ILLM представляет собой модель типа «precipitation-runoff-removal», трансформирующую метеопараметры (осадки и температуру воздуха) в сток и вынос биогенных элементов с водосбора в зависимости от характеристик подстилающей поверхности и интенсивности внешних воздействий естественного и антропогенного характера. При этом в модели ILLM предусмотрен расчет фоновой нагрузки. В соответствии с определением ХЕЛКОМ (Guidelines..., 2015) природная (фоновая) нагрузка биогенными веществами формируется за счет их выноса с необрабатываемых земель и части выноса с обрабатываемых земель, которая происходит независимо от хозяйственной деятельности.

3. Результаты и обсуждение

В качестве входной информации для выполнения расчетов необходимы сведения об осадках и температуре воздуха, площадях различных типов подстилающей поверхности, формирующих рассредоточенный вынос биогенных элементов со стоком, интенсивности точечных источников биогенной нагрузки, атмосферных выпадениях азота и фосфора, количестве домашних животных и птицы на водосборе, а также внесенных минеральных и органических удобрений.

Как отмечалось ранее, с целью информационного обеспечения модели проведена классификация типов подстилающих поверхностей водосбора. Значения концентраций азота фосфора в стоке с различных типов подстилающей поверхности задавалось по данным полевых исследований, проводив-

шихся в 2018 и 2019 годах сотрудниками Института озероведения РАН (Поздняков и др., 2020). Для оценки вклада точечных источников в формирование биогенной нагрузки на озеро использовались данные статистических форм государственной отчетности 2ТП(водхоз). Достаточно высокие значения коэффициентов эмиссии и концентраций в стоке с урбанизированных территорий являются выражением вклада рассредоточенного сельского населения, не имеющего подключения к канализационным сетям и очистным сооружениям (Behrendt and Opitz, 1999). Атмосферная нагрузка задавалась в соответствии с материалами исследований Казанского федерального университета (Минакова и др., 2019), при этом разделение на естественную и антропогенную составляющие не проводилось. Для калибровки модели использовались данные наблюдений за стоком и качеством воды на соответствующих постах государственного мониторинга Росгидромета в замыкающих створах рек Кудьмы и Линды за период с 2008 по настоящее время.

Сельскохозяйственная нагрузка азотом и фосфором на водосборы оценивалась по методике, представленной в работе (Брюханов и др., 2016). 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;
- удаленность 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 право- и левобережной частей водосбора водохранилища выполнялся пересчет значений нагрузки пропорционально соотношению площадей.

Проведена калибровка модели «precipitation-runoff-removal» на пилотных водосборах рек Кудьмы и Линды, результаты которой представлены ниже. На Рисунке 2 приведены рассчитанные и наблюдаемые слои стока с водосборов р. Линды – с. Васильково и р. Кудьмы – г. Кстово. Значение критерия Нэша-Сатклиффа – 78% для Линды и 67% для Кудьмы, что подтверждает адекватность модели описываемым процессам формирования стока на водосборе.

В Таблице 2 представлены результаты калибровки модели по соответствию средних многолетних значений выноса биогенных элементов

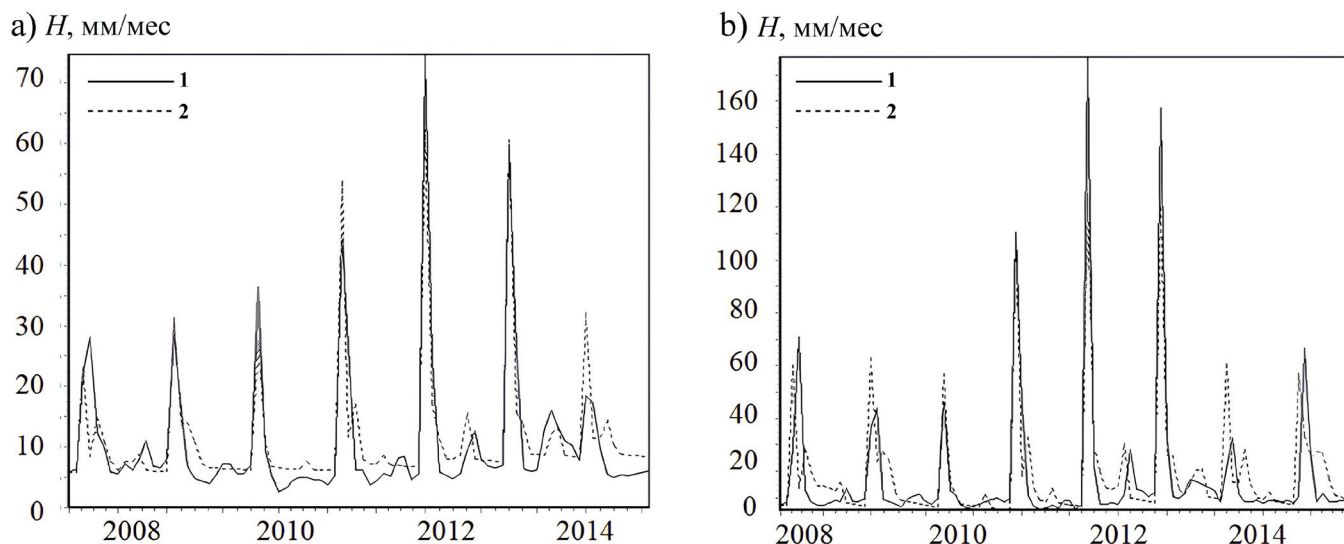


Рис.2. Наблюдаемые (1) и рассчитанные (2) среднемесячные слои стока с водосборов рек Кудьмы (а) и Линды (б).

со стоком в замыкающих створах рек Кудьмы и Линды, которые также подтверждают соответствие результатов моделирования имеющимся данным мониторинга.

При выполнении расчетов выноса азота и фосфора с право- и левобережной частей водосбора Чебоксарского водохранилища использовалась модель, откалиброванная на соответствующих пилотных водосборах. В качестве входной информации о структуре подстилающей поверхности водосбора водохранилища использовались данные дешифрирования космических снимков, о которых говорилось ранее. Отсутствующая информация об источниках антропогенной нагрузки задавалась на основе предположения о пропорциональности нагрузки площадям рассматриваемых водосборов, подверженных антропогенному воздействию. Результаты приближенной оценки биогенной нагрузки на Чебоксарское водохранилище, сделанной по данным моделирования стока и выноса азота и фосфора с пилотных водосборов, представлены в Таблице 3.

Согласно результатам расчетов, средняя многолетняя биогенная нагрузка на Чебоксарское водохранилище в год средней водности приближенно оценивается в 31320 тN/год и 725тP/год. При этом модуль выноса с правобережной части составляет 222 кг N/км²год и 5,6тP/км²год, с левобережной – 262 кг N/км²год и 5,4тP/км²год. Представленные данные моделирования не противоречат результатам других исследований выноса биогенных элементов притоками водохранилища (Ясинский и др., 2020).

4. Заключение

Таким образом, приближенная оценка биогенной нагрузки на крупный водный объект со стороны водосбора, не осященного в достаточной степени наблюдениями мониторинга, возможна при наличии следующих условий:

Таблица 2. Результаты калибровки модели на водосборах рек Кудьмы и Линды по соответствию значений выноса азота и фосфора в замыкающих створах.

Источник информации	Кудьма – створ Кстово		Линда – створ Васильково	
	N _{tot} , т/год	P _{tot} , т/год	N _{tot} , т/год	P _{tot} , т/год
Среднегодовые значения (по данным мониторинга)	715,69	18,00	443,73	9,16
Результаты калибровки	717	18,00	442	9,11

Таблица 3. Результаты приближенной оценки биогенной нагрузки на Чебоксарское водохранилище, сделанной по данным моделирования выноса азота и фосфора с пилотных водосборов.

Результаты расчета	N _{общ}	P _{общ}
Правобережье Чебоксарского водохранилища (площадь – 75687 км ² , средний многолетний 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 ² год)	222	5,6
Левобережье Чебоксарского водохранилища (площадь – 56176 км ² , средний многолетний слой стока 188 мм/год)		
Биогенная нагрузка на водохранилище (т/год)	14591	300
Природная (фоновая) составляющая (т/год)	4111	118
Модуль выноса (кг/км ² год)	262	5,4

- Выявлен достаточно хорошо изученный пилотный водосбор-аналог, имеющий пункт гидрологических и гидрохимических измерений в замыкающем створе и схожую с основным водосбором структуру подстилающей поверхности (например, по % площади основных классов подстилающей поверхности);
- Выбранная математическая модель «осадки-сток-вынос» обеспечена информацией об основных источниках биогенной нагрузки на гидрографическую сеть и откалибрована для замыкающего створа пилотного водосбора.

В этом случае отсутствие информация об источниках антропогенной нагрузки на весь водосбор в расчетах может быть компенсировано данными по пилотному объекту. При этом принимается предположение о пропорциональности параметров площади водосборов.

В тоже время необходимо помнить, что в будущих исследованиях для повышения степени достоверности полученные в результате моделирования результаты необходимо сравнить с данными регулярного наземного мониторинга стока и качества воды, которые должны быть организованы на основных притоках водохранилища.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств гранта РФФ 22-17-00224 «Формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах каскадов Верхне-Волжских и Камских водохранилищ при различных сценариях землепользования и изменениях климата на их территориях»

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

80 лет развития лимнологии в Институте озероведения Российской академии наук. 2023. В: Кондратьев С.А. (ред.). Москва: РАН. DOI: [10.12731/978-5-907645-12-7](https://doi.org/10.12731/978-5-907645-12-7)

Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. 1982. В: Петрова Н.А. (отв. ред.). Ленинград: Наука.

Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Обломкова Н.С. и др. 2016. Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты. Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства 89: 175–183.

Кондратьев С.А., Шмакова М.В. 2019. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор-водоток-водоем. Санкт-Петербург: Нестор-История.

Минакова Е. А., Шлычков А. П., Поздняков Ш. Р. и др. 2019. Оценка величины выпадений биогенных веществ из атмосферы на частный водосбор Куйбышевского водохранилища в пределах Республики Татарстан. Проблемы региональной экологии 1: 34–38.

Минеева Н.М., Семадени И.В., Макарова О.С. 2020. Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ р. Волги (2017–2018 гг.). Биология внутренних вод 2: 205–208.

Поздняков Ш.Р., Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А. и др. 2020. Перспективы сокращения выноса биогенных элементов с речных водосборов за счет внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) сельскохозяйственного производства (по результатам моделирования). Водные ресурсы 47(5): 588–602.

Росолимо Л.Л. 1977. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. Москва: Наука.

Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. 1993. Управление эвтрофированием водоемов. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат.

Ясинский С.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В. и др. 2020. Антропогенная нагрузка и влияние водосбора на диффузный сток биогенных элементов в крупный водный объект (на примере водосбора Чебоксарского водохранилища). Водные ресурсы 47(5): 630–648.

Applied methodology for the PLC-6 assessment, Baltic Marine Environment Protection Commission. 2019. HELCOM, Helsinki.

Behrendt H., Dannowski R. 2007. Nutrients and heavy metals in the Odra River system. Weissensee Verlag Publ., Germany.

Behrendt H., Opitz D. 1999. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load. Hydrobiologia 410: 111–122.

Buchhorn M., Bertels L., Smets B. et al. 2020. Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: version 3 Globe 2015-2019: Algorithm Theoretical Basis Document. Zenodo. Dataset v3.0. DOI: [10.5281/zenodo.3938968](https://doi.org/10.5281/zenodo.3938968)

Buchhorn M., Lesiv M., Tsensbazar N.-E. 2020. Copernicus Global Land Cover Layers—Collection 2. Remote Sensing 12(108): 1044. DOI:[10.3390/rs12061044](https://doi.org/10.3390/rs12061044)

Guidelines for the annual and periodical compilation and reporting of waterborne pollution inputs to the Baltic Sea (PLC-Water). 2015. In: Svendsen L.M. (ed.). Helsinki: HELCOM Publ.

Mousaei Sanjerehei M. 2014. Assessment of spectral vegetation indices for estimating vegetation cover in arid and semiarid shrublands. Range Management and Agroforestry 35(1): 91-100.

Pekel J., Cottam A., Gorelick N. et al. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature 540: 418-422.