

УДК 504

ДИНАМИКА ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА НАРВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (ПО ДАННЫМ 2011–2019 гг.)

Г. Т. Фруммин^{1,2}, М. А. Мурадлы²

¹ *Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия*

² *Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*

Рассмотрена динамика трофического статуса российской части акватории Нарвского водохранилища за период 2011–2019 гг. Для оценки трофического статуса использованы следующие показатели: индекс трофического состояния, концентрация хлорофилла *a*, концентрация фосфора общего. Установлено, что в обозначенный период водоем характеризуется как эвтрофный.

Ключевые слова: Нарвское водохранилище; эвтрофирование; трофический статус.

G. T. Frumin, M. A. Muradly. DYNAMICS OF THE TROPHIC STATUS OF THE NARVA STORAGE RESERVOIR (2011–2019)

The dynamics of the trophic status of the Narva storage reservoir for the period 2011–2019 was studied. The following indicators were used to assess the trophic status: trophic status index (ITS), chlorophyll *a* concentration, and total phosphorus concentration. It was found that for the period 2011–2018 the trophic status of the Russian part of the Narva reservoir was characterized as eutrophic.

Key words: Narva storage reservoir; eutrophication; trophic status.

Введение

Поскольку эвтрофирование водоемов стало серьезной глобальной экологической проблемой, по линии ЮНЕСКО началась активная деятельность, связанная с мониторингом внутренних вод и контролем за эвтрофированием водоемов земного шара. Эта работа проводится в разных странах и на разных континентах [Дмитриев, Фруммин, 2004, с. 103]. Актуальность проблемы в РФ обусловлена наличием в стране множества трансграничных (международных) водных объектов [Тимофеева, Фруммин,

2017]. К настоящему времени разработано более двадцати критериев оценки трофического статуса водных объектов [Дмитриев, 1995].

Использование индексов трофии, среди которых наиболее популярным в последние годы является индекс Карлсона, не сняло проблему оценки трофности водной экосистемы. Так, например, при изучении глубоких водохранилищ США исследователи использовали 22 индекса (как химических, так и биологических), и одно из водохранилищ Техаса было отнесено ими к классу олиготрофных по 11 индексам, к классу мезотрофных по 4 индексам и к классу

эвтрофных по 7 индексам [Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990].

Таким образом, вероятность ошибочной идентификации трофического статуса водоема может быть очень высокой в случаях использования: малоинформативных индексов; единственного индекса трофического состояния; индекса или группы индексов, адаптированных для условий одной климатической зоны, для определения трофности водоемов в другой климатической зоне; индексов, полученных для водных экосистем циклического типа, для оценки водных экосистем транзитного типа, а также в случаях проведения идентификации трофического статуса водоема по натурным исследованиям одного года (сезона, съемки).

Цель исследования – оценка динамики трофического статуса российской части акватории Нарвского водохранилища за период 2011–2019 гг. на основе применения трех различных показателей трофического статуса.

Материалы и методы

Нарвское водохранилище – трансграничный водный объект на реке Нарве и ее притоке Плюссе, расположенный на границе РФ и Эстонии (табл. 1, рис. 1). Регулярный гидрохимический мониторинг российской части акватории Нарвского водохранилища проводит ФГУ «Балтводхоз».

В данной работе трофический статус Нарвского водохранилища оценивали, используя три показателя: индекс трофического состояния (Index of trophical state, ITS), концентрация хлорофилла *a*, концентрация общего фосфора.

ITS рассчитан по следующей формуле [Алексеев и др., 2007; Булгаков, Шишкин, 2008]:

$$ITS = \frac{\sum_{i=1}^n pH_i}{n} + a \left(100 - \frac{\sum_{i=1}^n [O_2]_i}{n} \right), \quad (1)$$

где pH_i – рН, измеренный за определенный период; $[O_2]$ – кислород, в процентах насыщения; n – количество измерений; a – коэффициент, определяемый по формуле:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (pH_i \cdot [O_2]_i) - \frac{\sum_{i=1}^n (pH_i) \cdot \sum_{i=1}^n ([O_2]_i)}{n}}{\sum_{i=1}^n [O_2]_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n [O_2]_i)^2}{n}}. \quad (2)$$

Для упрощения расчетов по формулам (1) и (2) была разработана специальная компьютерная программа.

Уровень трофического статуса оценивали, используя классификацию, приведенную в табл. 2 [Фрумин, Хуан, 2012].

Результаты расчетов ITS, концентрации хлорофилла *a* и фосфора общего представлены в табл. 3.

Результаты и обсуждение

В последней строке табл. 3 приведены усредненные за период 2011–2019 гг. показатели, характеризующие трофический статус Нарвского водохранилища (9,2 для ITS, 9,6 мкг/дм³ для хлорофилла *a* и 46,1 мкг/дм³ для фосфора общего). Сопоставление этих величин с критериями трофического статуса (табл. 2) приводит к заключению, что российскую часть акватории Нарвского водохранилища можно идентифицировать как эвтрофный водоем.

Таблица 1. Морфометрические характеристики Нарвского водохранилища

Table 1. Morphometric description of the Narva storage reservoir

Площадь Area	191,4 км ² 191.4 km ²
Объем Volume	0,365 км ³ 0.365 km ³
Полезная емкость Useful capacity	91 млн м ³ 91 million m ³
Распределение акватории между странами Distribution of water area between the countries	Россия > 150 км ² , Эстония 40 км ² Russia > 150 km ² , Estonia 40 km ²
Нормальный подпорный уровень Normal retaining level	25 м 25 m
Наибольшая глубина Greatest depth	15 м 15 m
Средняя глубина Average depth	1,8 м 1.8 m
Площадь бассейна Pool area	55 848 км ² 55,848 km ²

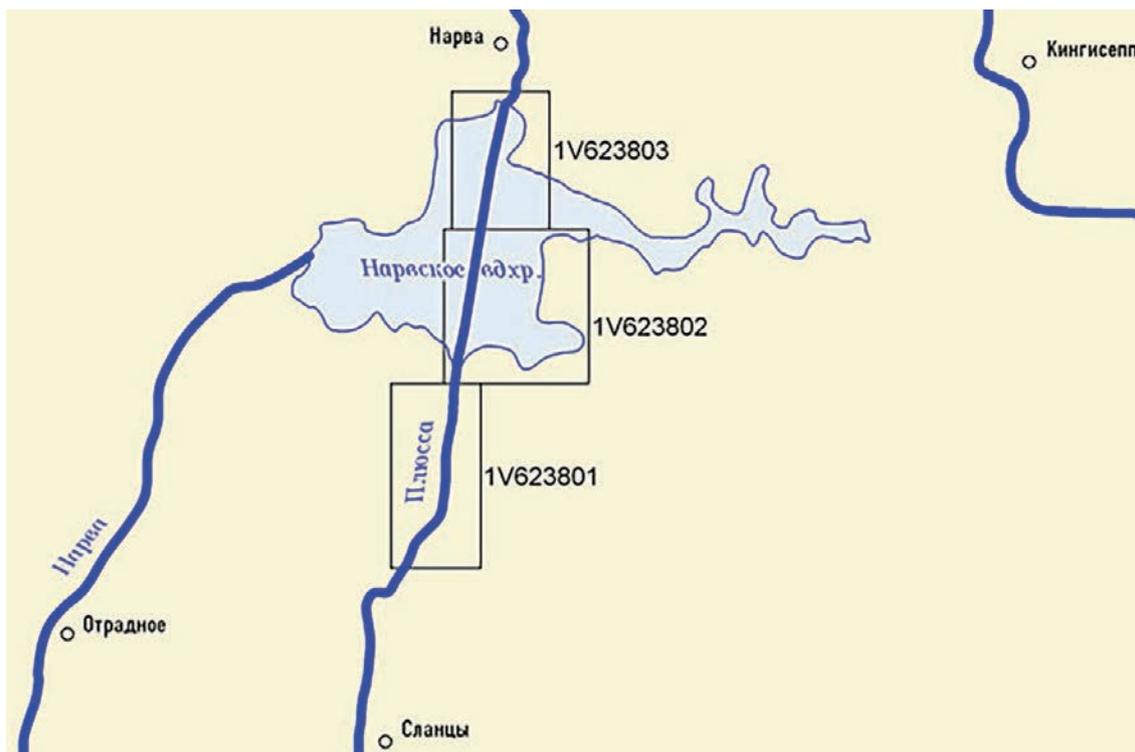


Рис. 1. Карта-схема Нарвского водохранилища

Fig. 1. Schematic map of the Narva reservoir

Таблица 2. Классификация критериев трофического статуса

Table 2. Classification of criteria for trophic status

Трофический статус Trophic status	ITS	Хлорофилл а, мкг/дм ³ Chlorophyll a, µg/dm ³	Фосфор общий, мкг/дм ³ Total phosphorus, µg/dm ³
Ультраолиготрофный Ultraoligotrophic	6,3 ± 0,3	< 1	< 4
Олиготрофный Oligotrophic	7,0 ± 0,3	< 2,5	< 10 < 10
Мезотрофный Mesotrophic	7,7 ± 0,3	2,5–8	10–35
Эвтрофный Eutrophic	> 8,3 ± 0,3	8–25	35–100
Гипертрофный Hypertrophic	-	> 25	> 100

Таблица 3. Динамика показателей, характеризующих трофический статус Нарвского водохранилища

Table 3. Dynamics of the indicators characterizing the trophic status of the Narva reservoir

Год Year	ITS	Хлорофилл а, мкг/дм ³ Chlorophyll a, µg /dm ³	Фосфор общий, мкг/дм ³ Total phosphorus, µg /dm ³
2011	8,4	19,6	50
2012	9,0	7,3	36
2013	8,8	10,1	45
2014	9,4	13,3	55
2015	9,5	4,9	30
2016	9,9	7,3	49
2017	10,2	5,9	64
2018	9,4	10,3	45
2019	8,3	7,3	41
Среднее Average	9,2	9,6	46,1

Высокий трофический статус Нарвского водохранилища обусловлен значительными концентрациями фосфора общего, то есть лимитанта первичной продукции. К примеру, средняя концентрация фосфора общего за период 2011–2019 гг. составляла 46,1 мкг/дм³.

Исследование зависимости трофического уровня водоема от количества поступающего в него фосфора привело к развитию так называемой нагрузочной концепции, в основу которой положено представление о существовании количественной связи между величиной поступления фосфора и реакцией водоема. Результатом этого, как правило, является изменение положения водоема на трофической шкале. Р. Фолленвайдером [Vollenweider, 1968] предложено первое приближение величины фосфорной нагрузки ($L_{кр}$, г P/м²·год), позволяющей водоему оставаться в олиготрофном состоянии, в расчете которой в качестве стандартного параметра используется только средняя глубина водоема ($H_{ср}$, м):

$$L_{кр} = 0,025 \cdot H_{ср}^{0,6}. \quad (3)$$

Результаты расчетов по формуле (3) для основных водоемов Псковско-Чудского озерного комплекса приведены в табл. 4.

Их следует рассматривать как ориентировочные, поскольку они получены без учета времени водообмена водного объекта, независимости биогенной нагрузки от поступления биогенных элементов (БЭ) из донных отложений и седиментационного фактора, учитывающего удержание БЭ в водоеме.

Для расчетов поступления (экспорта) фосфора общего в Нарвское водохранилище со стоком реки Нарвы использована следующая формула:

$$Q = 0,0315 \cdot C_{ср} \cdot R_{ср}, \quad (4)$$

где Q – поступление, т/год, $C_{ср}$ – среднегодовая концентрация биогенного элемента, мкг/дм³, $R_{ср}$ – среднегодовой расход воды, м³/с.

Результаты расчетов приведены на рис. 2.

Как следует из данных, приведенных на рис. 2, в среднем за период с 2011 по 2019 г. экспорт фосфора общего в Нарвское водохранилище со стоком реки Нарвы (428 т/год) превышал критическую фосфорную нагрузку (6,9 т/год) в 62 раза. Это означает, что необходимо принимать срочные управленческие решения по снижению фосфорной нагрузки на водохранилище со стоком рек и с водосбора.

Таблица 4. Критические нагрузки фосфором общим на основные водоемы Псковско-Чудского озерного комплекса (ориентировочно)

Table 4. Critical loads of total phosphorus on the main water bodies of the Pskov-Chudskoye lake complex (roughly)

Водоем Water body	Средняя глубина, H, м Average depth, H, m	Площадь, км ² Area, km ²	$L_{кр}$, г P/м ² ·год $L_{кр}$, g P/m ² ·year	Критическая нагрузка, т/год Critical load, tons/year
Псковское озеро Pskov lake	3,0	709	0,048	34
Чудское озеро Lake Peipsi	8,3	2611	0,089	232
Нарвское водохранилище Narva reservoir	1,8	191,4	0,036	6,9

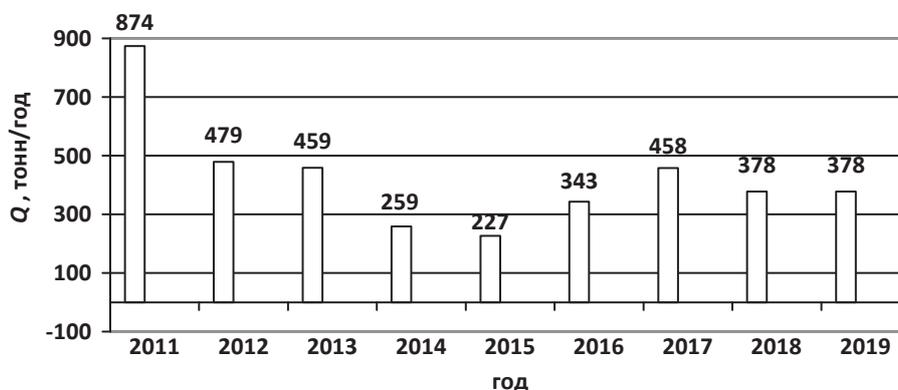


Рис. 2. Динамика поступления фосфора общего в Нарвское водохранилище со стоком реки Нарвы

Fig. 2. Dynamics of total phosphorus input into the Narva reservoir with the flow of the Narva River

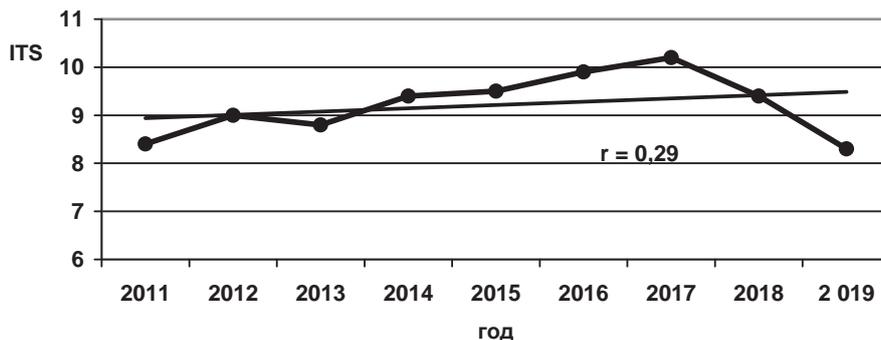


Рис. 3. Динамика величин ITS.

Здесь и далее: прямая линия – линия тренда

Fig. 3. Dynamics of ITS values.

Hereinafter: the straight line – trend line

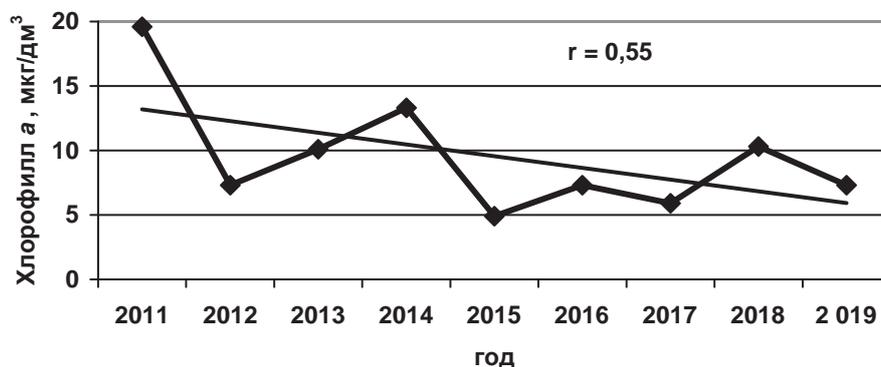


Рис. 4. Динамика концентраций хлорофилла а

Fig. 4. Dynamics of chlorophyll a concentrations

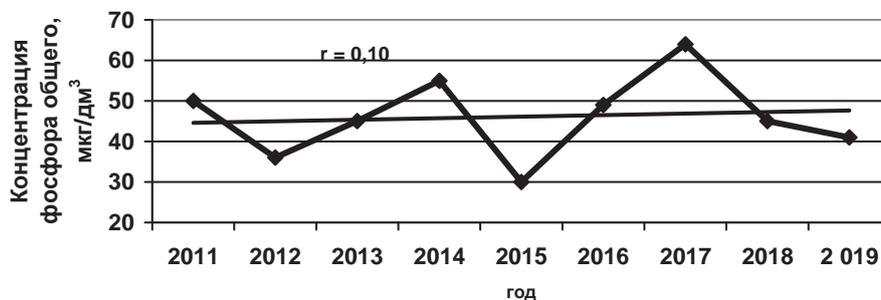


Рис. 5. Динамика концентраций фосфора общего

Fig. 5. Dynamics of total phosphorus concentrations

Дополнительно к вышеизложенному определены линейные тренды ITS, концентраций хлорофилла а и фосфора общего за период 2011–2019 гг. (рис. 3–5). Для качественной оценки трендов использована шкала Чеддока [Макарова, Трофимец, 2002].

На рис. 3–5 приведены коэффициенты корреляции и линии трендов. Согласно шкале Чеддока эти данные могут быть интерпретированы следующим образом: для ITS тренд «слабый» положительный, для хлорофилла а – «заметный» отрицательный, для фосфора общего – «слабый» положительный.

Выводы

1. В среднем за период 2011–2019 гг. российская акватория Нарвского водохранилища характеризуется как эвтрофный водоем. Высокий трофический статус водохранилища обусловлен высокими концентрациями фосфора общего, то есть лимитанта первичной продукции.

2. За период 2011–2019 гг. для индекса трофического состояния этого водоема зафиксирован «слабый» положительный тренд, для концентраций хлорофилла а – «заметный» отри-

цательный тренд, для концентраций фосфора общего – «слабый» положительный тренд.

3. Необходимы срочные управленческие решения по снижению фосфорной нагрузки на Нарвское водохранилище со стоком рек и с водосбора.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSZU-2020-0009.

Литература

Алексеев М. И., Цветкова Л. И., Копина Г. И. Методика расчетов региональных нормативов экологического благополучия водных объектов (Невской губы и восточной части Финского залива). СПб.: СПбГАСУ, 2007.

Булгаков И. П., Шишкин А. И. Применение нового показателя трофического состояния водоема для решения инженерных задач // Сб. тезисов IX Меж-

дунар. экологического форума «День Балтийского моря». СПб.: Диалог, 2008. С. 495–496.

Дмитриев В. В. Диагностика и моделирование водных экосистем. СПб.: СПбГУ, 1995. 215 с.

Дмитриев В. В., Фрумин Г. Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: СПбГУ, РГГМУ, 2004. 294 с.

Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.

Тимофеева Л. А., Фрумин Г. Т. Трансграничные водные объекты. СПб.: СпецЛит, 2017. 159 с.

Фрумин Г. Т., Хуан Ж.-Ж. Вероятностная оценка трофического статуса водных объектов. Методическое пособие. СПб.: РГГМУ, 2012. 28 с.

Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.

Vollenweider R. A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication // Tech. Rep. Organiz. Econom. Cooper. Devel. 1968. Vol. 27. 159 p.

Поступила в редакцию 20.08.2020

References

Alekseev M. I., Tsvetkova L. I., Kopina G. I. Metodika raschetov regional'nykh normativov ekologicheskogo blagopoluchiya vodnykh ob'ektov (Nevskoi guby i vostochnoi chasti Finskogo zaliva) [A method for calculating regional standards for the ecological well-being of water bodies (Neva Bay and the eastern part of the Gulf of Finland)]. St. Petersburg: SPbGASU, 2007.

Bulgakov I. P., Shishkin A. I. Primenenie novogo pokazatelya troficheskogo sostoyaniya vodoema dlya resheniya inzhenernykh zadach [Application of a new indicator of the trophic state of a reservoir for solving engineering problems]. Sb. tezisov IX Mezhdunar. ekol. foruma «Den' Baltiiskogo morya» [Proceed. IX Int. environ. forum *Baltic Sea Day*]. St. Petersburg: Dialog, 2008. P. 495–496.

Dmitriev V. V. Diagnostika i modelirovanie vodnykh ekosistem [Diagnostics and modeling of aquatic ecosystems]. St. Petersburg: SPbGU, 1995. 215 p.

Dmitriev V. V., Frumin G. T. Ekologicheskoe normirovanie i ustoichivost' prirodnykh system [Environmental regulation and sustainability of natural systems]. St. Petersburg: SPbGU, RGGMU, 2004. 294 p.

Frumin G. T., Khuan Zh.-Zh. Veroyatnostnaya otsenka troficheskogo statusa vodnykh ob'ektov. Metod. posobie [Probabilistic assessment of the trophic status of water bodies. Guidelines]. St. Petersburg: RGGMU, 2012. 28 p.

Khenderson-Sellers B., Marklend Kh. R. Umirayushchie ozera. Prichiny i kontrol' antropogennogo evtrofirovaniya [Dying lakes. Causes and regulation of man-induced eutrophication]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 280 p.

Makarova N. V., Trofimets V. Ya. Statistika v Excel [Excel statistics]. Moscow: Finansy i statistika, 2002. 368 p.

Timofeeva L. A., Frumin G. T. Transgranichnye vodnye ob'ekty [Transboundary water bodies]. St. Petersburg: SpetsLit, 2017. 159 p.

Vollenweider R. A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication // Tech. Rep. Organiz. Econom. Cooper. Devel. 1968. Vol. 27. 159 p.

Received August 20, 2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Фрумин Григорий Тевелевич

профессор Департамента науки, технологий и инноваций,
д. х. н., проф.

Российский государственный гидрометеорологический
университет
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007

профессор, ведущий научный сотрудник каф. физической
географии и природопользования факультета географии
Российский государственный педагогический университет
им. А. И. Герцена
наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, Россия, 191186
эл. почта: gfrumin@mail.ru
тел.: +79111274098

Мурадлы Метин Азерчинович

магистр II курса кафедры геоэкологии, природопользования
и экологической безопасности

Российский государственный гидрометеорологический
университет
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: metin.muradlu.97@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Frumin, Grigory

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhkaya St., 192007 St. Petersburg, Russia

Herzen State Pedagogical University of Russia
48 Nab. R. Moiki, 191186 St. Petersburg, Russia
e-mail: gfrumin@mail.ru
tel.: +79111274098

Muradly, Metin

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhkaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: metin.muradlu.97@mail.ru