

ISSN 2304-9081

Учредители:  
Уральское отделение РАН  
Оренбургский научный центр УрО РАН

**Бюллетень**  
**Оренбургского научного центра**  
**УрО РАН**  
(электронный журнал)



**2014 \* № 1**

On-line версия журнала на сайте  
<http://www.elmag.uran.ru>

© Коллектив авторов, 2014

УДК 574.52

*Т.Н. Яценко-Степанова, Н.В. Немцева, М.Е. Игнатенко*

## **ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТРОФНОСТИ ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМОВ**

Институт клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН, Оренбург, Россия

В обзоре отражены основные подходы к оценке уровня трофности природных водоемов. Показана необходимость продолжения поиска адекватных показателей, обладающих высокой степенью информативности, но измерение которых сочетало бы в себе приемлемые уровни сложности, точности, универсальности.

*Ключевые слова:* трофность, эвтрофирование, способы определения уровня трофности.

*T.N. Yatsenko-Stepanova, N.V. Nemtseva, M.E. Ignatenko*

---

---

## **BASIC APPROACHES TO IDENTIFY THE TROPHIC LEVEL OF NATURAL WATER BODIES**

Institute of Cellular and Intracellular Symbiosis UrB RAS, Orenburg, Russia

The review contains the basic approaches to determining the trophic level in natural water bodies. Shows the need to continue the search for adequate indicators possessing a high degree of informativeness, but the measurement of which would combine with acceptable levels of complexity, accuracy, versatility.

*Key words:* trophicity eutrophication, methods for determining the trophic level.

Важнейшим прикладным аспектом гидробиологических исследований является определение степени трофии водоемов, которую обязательно учитывают при оценке эколого-санитарного состояния водоема и решении вопроса о его практическом использовании в народнохозяйственных целях. Кроме того в связи с возрастающим эвтрофированием пресноводных водоемов важное значение приобретает мониторинг трофности, что является предпосылкой для принятия своевременных природоохранных мер.

В основе трофической типизации водных экосистем лежит оценка уровня биопродуктивности, которая является главной функциональной характеристикой водоема [9, 24]. Начало биологической классификации озер по уровню их продуктивности («кормности») было положено в 20-30-х годах 20-го века, когда А. Тинеман [57] и Е. Науман [47] показали, что уровень

биологической продуктивности (трофия) тесно связан с характером водосбора, географическим положением водоема и абиотическими факторами среды и предложили описательную терминологию разделения озер на олиго-, мезо- и эвтрофные.

На современном этапе термин «трофность» означает: а) количество биомассы и продукции автотрофных организмов водоема; б) наличие в водоеме питательных веществ и других условий, необходимых для существования растений [10]. К олиготрофным относятся озера с низким содержанием биогенов и, следовательно, с низкой биологической продуктивностью; к эвтрофным – с обильным поступлением биогенных веществ и высокими темпами биологического продуцирования; мезотрофные – по уровню поступления биогенных веществ и темпам образования биологической продукции занимают промежуточное положение между олиго- и эвтрофными. Таким образом, эвтрофирование водоемов (эвтрофикация) означает повышение уровня первичной продукции вод благодаря увеличению в них концентрации биогенных элементов (главным образом азота и фосфора) под действием антропогенных или естественных факторов [49].

Повышение до определенного уровня первичной продукции при эвтрофикации водоемов создает основу для развития более богатой кормовой базы рыб и других гидробионтов и способствует увеличению их численности; затем качество воды может ухудшиться: возникает ее «цветение», зарастает прибрежная зона, уменьшаются прозрачность и содержание кислорода. Высокая степень эвтрофирования приводит к заморам рыб и других гидробионтов [48].

В настоящее время отнесение природных вод к определенному трофическому типу производится на основе различных критериев, в том числе физических, химических, биохимических, биологических характеристик и показателей функционирования экосистемы, а также материалов космических съемок со спутников.

Из физических показателей при оценке эвтрофирования учитывается такой достаточно приближенный (но широко используемый из-за простоты метода определения) параметр, как прозрачность воды [2, 11, 16, 24, 38, 56].

Из химических показателей используют концентрацию биогенных веществ. Многочисленные исследования, посвященные изучению эвтрофиро-

вания водоемов, подтвердили как ведущую роль фосфора и азота в процессе эвтрофирования, так и важность для этого процесса количественного соотношения азота и фосфора в воде водоема [3, 8, 22, 24, 30, 31, 33, 35, 39, 40, 46, 54].

Однако неоднократно описаны случаи, когда при почти полном отсутствии минеральных веществ в среде, фитопланктон, тем не менее, продуцирует новое вещество. Это явление связано со способностью водорослей накапливать биогенные вещества в клетках. Показано, что для популяций водорослей характерно наличие лаг-фазы – периода между началом поступления к ним питательных веществ и началом клеточного деления. В этот отрезок времени, длительность которого достигает 10-15 суток, происходит запасание клетками биогенных элементов. Например, в зависимости от внешних условий, содержание фосфора в одноклеточных водорослях одного вида может, различаться в 10–30 раз; азота – до 5 раз; диапазон отклонений N:P от 4,1 до 291; изменчивость отношений запасов углерода к запасам фосфора в клетках от 3,3 до 500 [12, 23, 25, 34, 59]. Поэтому зависимость между концентрациями биогенов и величиной первичной продукции зачастую имеет невысокий коэффициент корреляции.

К биохимическим показателям относят величину первичной продукции водоемов. Основоположителем системы классифицирования водоемов по величине первичной продукции является Г.Г. Винберг [5]. На протяжении последующего времени система получила дальнейшее развитие [1, 4, 7, 11]. Вместе с тем, как показал В.В. Бульон [4], этот критерий имеет исключительно высокую пространственно-временную изменчивость.

К биологическим критериям уровня трофии относят количественные показатели развития фитопланктона (обычно биомассу), характер сезонной динамики и средние за сезон величины [22]. В качестве показателя биомассы фитопланктона широко используется содержание хлорофилла в планктоне [4, 13, 14, 21, 48].

Биомасса фитопланктона, содержание хлорофилла *a* и общего органического углерода легли в основу классификации трофических состояний OECD [53]. Однако, как показали исследования L. Tuvikene et al. [58], такие традиционно используемые критерии, как концентрация биогенных веществ и хлорофилла, биомасса фитопланктона и прозрачность воды могут давать

«размытое» отражение трофического статуса или даже показывать мнимое улучшение экологического состояния.

К биологическим критериям уровня трофии относят также видовой состав, соотношение групп водорослей и сезонную сукцессию фитопланктона [18, 20, 28, 45, 51, 55].

В то же время ряд авторов отмечает, что корреляция между отдельными показателями трофности водной среды не всегда достаточна, и водоем может быть отнесен к разным типам трофности при использовании разных показателей. Поэтому для оценки трофности водоема используют комплексные индексы, полученные путем формального осреднения нескольких оценок, либо методами статистического анализа [15, 24, 26, 36, 37, 42, 43, 50]. Одним из таких индексов является индекс степени трофности [18, 31].

В целом для их использования требуется от 3 до 40 и более переменных. Следует принять во внимание и то, что имеется немало случаев весьма противоречивых суждений и выводов [6, 26, 41]. Кроме того, при сравнении как индексов, так и комплексов доминирующих видов для водоемов разного трофического типа, выяснилось, что они, как правило, показательны только для крайних типов (олиготрофное-эвтрофное), но не позволяют различить переходы от одного уровня продуктивности к другому.

В настоящее время для изучения процессов эвтрофирования и трофической классификации водоемов используются материалы космических съемок со спутников [27, 32, 44, 52]. Однако стоимость и доступность таких проектов не позволяет использовать их в качестве мониторинговых.

Таким образом, несмотря на то, что на сегодняшний день нет недостатка в предложениях показателей и количественных индексов, точная оценка трофического уровня конкретного водоема остается весьма серьезной проблемой [7, 8]. Особенно это касается дифференциации между мезотрофным и эвтрофным состоянием пресных непроточных водоемов, что актуально, поскольку: а) в настоящее время из-за возрастающего эвтрофирования пресноводных водоемов наиболее распространенными типами являются именно мезотрофные и эвтрофные водоемы; б) различить переходы от мезотрофного состояния к эвтрофному, особенно на слабоэвтрофной стадии, достаточно сложно [6, 19, 21].

В связи с этим очевидна необходимость продолжения поиска адекват-

ных показателей трофии водоемов, обладающих высокой степенью информативности, но измерение которых сочетало бы в себе приемлемые уровни сложности, точности и универсальности.

*(Работа выполнена по Программе инициативных проектов фундаментальных исследований Уральского отделения РАН проект № 12-У-4-1031)*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александров С.В., Дмитриева О.А. Первичная продукция и показатели фитопланктона как критерий эвтрофирования Куршского залива Балтийского моря. Водные ресурсы. 2006. 1: 104-110.
2. Богданова О.Г. Экологическое состояние озер Челябинской области и меры по его улучшению: Автореф. дисс.... канд. биол. наук. Пермь, 2009. 23 с.
3. Булгаков Н.Г., Левич А.П. Биогенные элементы в среде и фитопланктон: отношение азота к фосфору как самостоятельный регулирующий фактор. Успехи современной биологии. 1995. 1: 13-23.
4. Бульон В.В. Закономерности первичной продукции планктона и их значение для контроля и прогнозирования трофического состояния водных экосистем. Биология внутренних вод. 1997. 1: 13-22.
5. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Академии Наук БССР, 1960. 329 с.
6. Данилов Р.А. Структура популяций планктонных водорослей и трофность озер: возможность использования экологических индексов при непрерывном мониторинге трофности. Гидробиологический журнал. 2002. 4: 10 - 14.
7. Даценко Ю.С. Ветрова Е.И. Оценка трофического состояния озер умеренной зоны по характеристикам их кислородного режима. Вестник Московского университета. Сер. 5, География. 2006. 1: 36-39.
8. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. Москва: ГЕОС, 2007. 251 с.
9. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 2003. 348 с.
10. Зданович В.В., Криксунов Е.А. Гидробиология и общая экология: словарь терминов. М.: Дрофа, 2004. 192 с.
11. Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озёр разных природных зон. М., 1984. 207 с.
12. Клоченко П.Д., Медведев В.А., Борисова Е.В., Царенко П.М. Особенности накопления нитритного азота в культурах хлорококковых (*Chlorococcales*, *Chlorophyta*) водорослей. Альгология. 2000. 3: 257-264.
13. Корнева Л.Г. Формирование фитопланктона водоемов бассейна Волги под влиянием природных и антропогенных факторов. Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. СПб, 2009. 47 с.
14. Минеева Н.М. Растительные пигменты в воде Волжских водохранилищ. М.: Наука, 2004. 156 с.
15. Моисеенко Т.И., Гапеева М.В., Рогов А.В. Оценка биопродуктивности водоемов с помощью ГИС. [Электронный ресурс] Сделано в России. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/114.pdf>.
16. Мусатов А.П. Оценка параметров экосистем внутренних водоемов. М., Научный мир, 2001. 192 с.
17. Немцева Н.В., Яценко-Степанова Т.Н., Бухарин О.В. Определение уровня трофии водоемов озерного типа. ЖМЭИ. 2008. 4: 101-103.
18. Охапкин А.Г., Микульчик И.А., Корнева Л.Г., Минеева Н.М. Фитопланктон Горьковского водохранилища. Тольятти, 1997. 224 с.

19. Прыткова М.Я. Научные основы и методы восстановления озерных экосистем при разных видах антропогенного воздействия / Отв. редактор Жукова Т.П. СПб.: Наука, 2002. 148 с.
20. Сиделев С. И., Бабаназарова О. В. Структура фитопланктона высокоэвтрофного озера Неро. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2008. 4 (20): 187-190.
21. Трифонова И.С. Оценка трофического статуса водоемов по содержанию хлорофилла «а» в планктоне. В кн.: Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993: 158–166.
22. Трифонова И.С., Беляков В.П., Афанасьева А.Л. и др. Состояние биоценозов озерно-речной системы Вуоксы. СПб.: ВВМ, 2004. 148 с.
23. Фурсова П.В., Левич А.П. Дифференциальные уравнения в моделировании сообществ микроорганизмов. Успехи современной биологии. 2006. 2: 149-179.
24. Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х.Р. Умирающие озёра. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 279 с.
25. Чалаева С.А. Физиологическое состояние культур зеленых микроводорослей и накопление внеклеточных органических веществ. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2004. 23 с.
26. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения (в 2 кн.). М., Наука, 2005. Кн. 1- 281с. Кн. 2. – 337 с.
27. Шумаков Ф. Т. Космический мониторинг эвтрофирования водных ресурсов Украины. Коммунальное хозяйство городов. 2007. 79: 217-231.
28. Экология фитопланктона Рыбинского водохранилища / Под ред. В.Н. Паутовой и Г.С.Розенберга. Тольятти: Издательство Самарского научн. центра РАН, 1999. 264 с.
29. Яценко-Степанова Т.Н., Немцева Н.В., Муравьева М.Е. (Игнатенко М.Е.), Бухарин О.В. Экспресс-метод оценки уровня трофности озер. Вестник Оренбургского государственного университета. 2007. 75: 436-439.
30. Aslan S., Kapdan I.K. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. Ecological Engineering. 2006. 1: 64-70.
31. Barga S., White J., Li C. et al. Effects of freshwater input on nutrient loading phytoplankton biomass and cyanotoxin production in an oligosaline estuarine lake. Hydrobiologia. 2011. 1: 377-389.
32. Brezonik P.L., Menken K.D., Bauer M.E. Landsat-based remote sensing of lake water quality characteristics, including chlorophyll and colored dissolved organic matter (CDOM). Lake and Reservoir Management. 2005. 21(4): 373-382.
33. Brodie J.E., Devlin M., Haynes D., Waterhouse J. Assessment of the eutrophication status of the Great Barrier Reef lagoon (Australia). Biogeochemistry. DOI 10.1007/s10533-010-9542-2. Published online. Springer. 2010. 22 p.
34. Chen M., Tang H., Ma H. et al. Effect of nutrients on growth and lipid accumulation in the green algae *Dunaliella tertiolecta*. Bioresource Technology. 2011. 2: 1649-1655.
35. Chen X., Xiangdong Y., Dong Xuhui, Liu Qian. Nutrient dynamics linked to hydrological condition and anthropogenic nutrient loading in Chaohu Lake (southeast China). Hydrobiologia. 2011. 1: 223-234.
36. Fu-Liu Xu, Shu Tao, Dawson R.W., Beng-Gang Li. A GIS-based method of lake eutrophication assessment. Ecological Modell. 2001. 144: 231-244.
37. Hakanson L., Boulion V.V. Regularities in primary production, secchi depth and fish yield and a new system to define trophic and humic state indices for lake ecosystems. Internat. Rev. Hydrobiol. 2001. 1: 23-62.
38. Indicators and methods for the ecological status assessment under the Water Framework Directive. European Communities, 2006. 225 p.
39. Jeppesen E., Kronvang B., Olesen J. et al. Climate change effects on nitrogen loading from cultivated catchments in Europe: implications for nitrogen retention ecological state of lakes

- and adaptation. *Hydrobiologia*. 2011. 1: 1-21.
40. Kaj Sand-Jensen, Peter A. Stæhr scaling of pelagic metabolism to size, trophic and forest cover in small Danish lakes. 2007. 10: 127–141.
  41. Karydis M., Tsirtsis G. Ecological indices: a biometric approach for assessing eutrophication level in the marine environment. *Sci. Tot. Envir.* 1996. 186: 209-219.
  42. Kelly M.G., Whitton B.A. Biological monitoring of eutrophication in rivers. *Hydrobiologia*. 1998. 384: 55–67.
  43. Kitsiou D., Karydis M. Categorical mapping of marine eutrophication based on ecological indices. *Science Tot. Environ.* 2000. 255: 113-127.
  44. Kloiber S.M., Brezonik P.L., Olmanson L.G., Bauer M.E. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. *Remote Sensing of Environment*. 2002. 82: 38-47.
  45. Korneva L.G., Solovyova V.V. Spatial organization of phytoplankton in reservoir of Volga river. *Hydrobiology*. 1998. 836: 163–166.
  46. Lehman J. Nuisance cyanobacteria in an urbanized impoundment: interacting internal phosphorus loading, nitrogen metabolism, and polymixis. *Hydrobiologia*. 2011. 1: 277-287.
  47. Naumann E. Grundzuge der regionale Limnologie. *Binnengewasser*. 1932. 11: 291-323.
  48. OECD. Eutrophication of waters: Monitoring, assessment and control. P., 1982. 155 p.
  49. OSPAR Commission, 2008: Second Integrated Report on the Eutrophication Status of the OSPAR Maritime Area. 2008. 108 p.
  50. Rask M., Vuori K.-M., Hämäläinen H. et al. Ecological classification of large lakes in Finland: comparison of classification approaches using multiple quality elements. *Hydrobiologia*. 2011. 1: 37-47.
  51. Reynolds C.S., Huszar V., Kruk C. et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*. 2002. 5: 417-428.
  52. Sawaya K.E., Olmanson L.G., Heinert H.J. et al. Extending satellite remote sensing to local scales: land and water resource monitoring using high-resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2002. 88: 144-156.
  53. Seip K.L., Jeppesen E., Jensen J.P., Faafeng B. Is trophic state or regional location the strongest determinant for Chl-a/TP relationships in lakes? *Aquat.sci.* 2000. 2: 195-204.
  54. Shilla D.A., Asaeda T., Kalibbala M. Phosphorus speciation in Myall Lake sediment, NSW, Australia. *Wetlands Ecol Manage.* 2009. 17: 85–91.
  55. Spellerberg I.F. *Monitoring ecological change*. Cambridge: Cambridge University press, 1991. 334 p.
  56. Strobl R.O., Forte F., Pennetta L. Application of artificial neural networks for classifying lake eutrophication status. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*. 2007. 1: 15–25.
  57. Thienemann A. *Die Binnengewässer Mitteleuropas*. *Binnengewasser*. 1925. 1: 1-255
  58. Tuvikene L., Nõges T., Nõges P. Why do phytoplankton species composition and “traditional” water quality parameters indicate different ecological status of a large shallow lake? *Hydrobiologia*. 2011. 1: 3-15.
  59. Xina L., Hong-Ying H., Keb G., Ying-Xue S. Effects of different nitrogen and phosphorus concentrations on the growth, nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalga *Scenedesmus* sp. *Bioresource Technology*. 2010. 14: 5494-5500.

*Поступила 28.03.2013*

*(Контактная информация: Яценко-Степанова Татьяна Николаевна – д.б.н., доцент, ведущий научный сотрудник Института клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН, 460000 г. Оренбург, ул. Пионерская, 11, тел/факс (3532) 77-54-17, e-mail: [yacenkostn@gmail.com](mailto:yacenkostn@gmail.com)).*