

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ*

Представлены результаты термодинамической оценки динамики трофического статуса различных акваторий трансграничного Чудско-Псковского озёрного комплекса (центральная часть Псковского озера, западная и восточная части Чудского озера) и озера Тайху.

Ключевые слова:

водный объект, озеро Тайху, термодинамическая характеристика, Чудско-Псковский озёрный комплекс, фосфор минеральный, эвтрофирование.

Основные работы, посвященные оценке состояния водных объектов, за редким исключением, не включают в себя рассмотрение термодинамических характеристик, являющихся фундаментальными [11]. Известны лишь отдельные работы, основанные на использовании термодинамических параметров [1–10; 12–14]. В работе [10] предложен новый вариант термодинамического подхода к оценке состояния водных объектов, комплексно учитывающий поступление и содержание в них органических соединений и металлов.

Гидросфера служит естественным аккумулятором большинства загрязняющих веществ, поступающих непосредственно в атмосферу или литосферу. Это связано с наличием глобального цикла круговорота воды, со способностью воды к растворению различных газов и минеральных солей, а также с тем, что любой водоем служит своего рода ямой, куда вместе с потоками воды смываются с суши всевозможные твердые частицы. Кроме того, вода в силу своего широкого использования в промышленности, сельском хозяйстве, в быту подвержена и непосредственному антропогенному загрязнению. Вместе с тем, будучи естественной средой обитания живых организмов (гидробионтов), вода находится в динамически равновесном состоянии обмена биогенными вещества-

ми с водной биотой. Присутствие загрязняющих веществ в водной среде, чуждых живой природе, оказывает влияние на процессы жизнедеятельности отдельных живых организмов и на функционирование всей водной экосистемы.

Из множества современных гидроэкологических проблем одной из центральных является проблема эвтрофирования. Эвтрофирование – повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления в воде биогенных элементов под действием антропогенных и естественных (природных) факторов. Особо следует подчеркнуть, что между эвтрофированием и загрязнением имеется существенная разница, заключающаяся, прежде всего в том, что загрязнение обусловлено сбросом токсических веществ, подавляющих биологическую продуктивность водоемов, а эвтрофирование до известной степени повышает продуктивность.

Эвтрофирование представляет собой естественный процесс эволюции водоема. С момента «рождения» водоема в естественных условиях проходит несколько стадий в своем развитии: на ранних стадиях – от ультраолиготрофного до олиготрофного, далее становится мезотрофным и в конце концов водоем превращается в эвтрофный и гиперэвтрофный – происходит «старение» и гибель водоема с образованием болота.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ по гранту 14.В37.21.0651 «Разработка методов квотирования биогенных нагрузок и снижения рисков химического и биологического загрязнения трансграничных водных объектов на основе комплексного анализа данных гидрометеорологического мониторинга».

Поскольку эвтрофирование водоемов стало серьезной глобальной экологической проблемой, по линии ЮНЕСКО начаты работы по мониторингу внутренних вод, контроль за эвтрофированием водоемов земного шара.

В связи с изложенным цель исследования заключалась в оценке трофических статусов некоторых пресноводных и морских экосистем на основе термодинамических представлений.

В исследовании были использованы первичные данные мониторинга Псковско-Чудского озерного комплекса и озера Тайху.

В работе [4] показано, что значения минимальных энергетических затрат, вычисленные для виртуальной модели процесса вовлечения элементов минерального питания в клетки фитопланктона, являются универсальными критериями обеспеченности фитопланктона этими элементами. Эти критерии в некоторых случаях могут быть сопоставлены с качественными характеристиками трофии природных водоемов. На основании достаточно строгого термодинамического (энтропийного) анализа А.Г. Волохонским получено следующее выражение для расчета энергетической меры обеспеченности фитопланктона одним из элементов минерального питания (для элемента, находящегося в первом минимуме):

$$E_i = -1,34 \log \beta_i \quad (1)$$

Величина E (ккал/г-атом) выражает количество энергии, необходимое для организации 1 г-атома элемента. Эта величина зависит не только от отношения концентраций элемента в клетке и в среде, но и от содержания в среде других более или менее дефицитных элементов.

Величина β_i рассчитывается из следующего выражения:

$$\beta_i = C_{\text{кл}}/C_{\text{о}} \quad (2)$$

где $C_{\text{кл}}$ – концентрация элемента в клетке; $C_{\text{о}}$ – концентрация элемента в среде.

Эти величины количественно характеризуют наличие соответствующего элемента в среде по отношению к клеткам фитопланктона определенного состава и могут служить мерой обеспеченности. Если $\beta_i < 1$, данный элемент находится в среде заведомо в избытке. Так как β для водорода и кислорода всегда меньше 1, эти элементы из рассмотрения исключены. Тот элемент, для которого β_i наибольшее, является наиболее дефицитным (первый минимум).

Для практических расчетов на основании данных А.П. Виноградова был

принят следующий средний состав клеток: вода – 82%, зола – 11% сухого веса; состав органического вещества: углеводы – 54%, липиды – 10%, белки – 36%, что соответствует $C_S = 8.104$ мг/л; $C_N = 1.104$ мг/л; $C_P = 1.103$ мг/л [4].

Величина E имеет смысл количественного критерия обеспеченности любыми элементами минерального питания фитопланктона любых сред – как природных, так и синтетических. В первом случае (водоемы) критерий E должен увязываться с характеристикой трофии. Решающее значение для природных сред имеют критерии обеспеченности основными элементами минерального питания – углеродом, азотом и фосфором. Причем за исходные концентрации в расчетах следует принимать содержание этих элементов в период максимального развития минерализации органического вещества в водоеме (период с января по март).

В рассматриваемой работе автором приведена шкала трофии для озер Северного и Северо-Западного регионов России (табл. 1).

В эвтрофировании водоемов принимают участие два главных биогенных элемента – азот и фосфор. Если $N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}}$ (отношение содержания минерального азота к содержанию минерального фосфора) меньше 10, то первичная продукция фитопланктона лимитируется азотом, при $N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}} > 17$ – фосфором, при $N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}} = 10-17$ – азотом и фосфором одновременно [6].

Предварительными расчетами было установлено, что лимитантом первичной продукции в озерах Псковско-Чудского озерного комплекса и в озере Тайху (Китай) является фосфор. В этом случае формула (2) приводится к виду:

$$\beta_P = 10^3/C_P \quad (3)$$

По формулам (1) и (3) были проведены расчеты величин EP для трех акваторий Псковско-Чудского озерного комплекса за период 2006–2011 гг. (табл. 2).

Обобщение данные, представленные в табл. 2, свидетельствует о том, что за период с 2006 г. по 2011 г. трофический статус центральной части Псковского озера и западной части Чудского озера (территориальные воды Эстонии) характеризуется как мезотрофный. Трофический статус восточной части Чудского озера (территориальные воды России) характеризуется как олиготрофный (табл. 3). Этот результат следует рассматривать как сугубо ориен-

Примерная шкала трофии для озер Северо-Запада европейской части СССР [4]

Характеристика трофии водоемов	E_1 для элемента, находящегося в первом минимуме, ккал/г-атом
Олигоацидотрофные	7,5 и выше
Олиготрофные	6,8 – 7,5
Мезотрофные	5,8 – 6,8
Эвтрофные	5,8 и ниже

Таблица 2

Динамика величин E_p и трофический статус акваторий Псковско-Чудского озера

Год	Псковское озеро (центральная часть)		Чудское озеро (восточная часть)		Чудское озеро (западная часть)	
	- E_p	статус	- E_p	статус	- E_p	статус
2006	6,36	мезотрофный	7,00	олиготрофный	6,46	мезотрофный
2007	6,59	мезотрофный	8,04	олигоацидотрофный	6,55	мезотрофный
2008	7,00	олиготрофный	8,04	олигоацидотрофный	6,91	мезотрофный
2009	6,30	мезотрофный	7,40	олиготрофный	6,27	мезотрофный
2010	6,22	мезотрофный	6,46	мезотрофный	6,14	мезотрофный
2011	6,39	мезотрофный	7,10	олиготрофный	6,24	мезотрофный

Таблица 3

Величины E_p и трофический статус акваторий Псковско-Чудского озера (усредненные данные за период 2006–2011 гг.)

Акватория	- E_p , ккал/г.атом	Трофический статус
Псковское озеро (центральная часть)	6,48(6,17÷6,79)	мезотрофный
Чудское озеро (западная часть)	6,43(6,15÷6,71)	мезотрофный
Чудское озеро (восточная часть)	7,32(6,63÷8,01)	олиготрофный

Таблица 4

Динамика величин E_p и трофический статус озера Тайху

Год	- E_p , ккал/г.атом	Трофический статус	Год	- E_p , ккал/г.атом	Трофический статус
1985	6,20	мезотрофный	1999	5,37	эвтрофный
1986	6,10	мезотрофный	2000	5,03	эвтрофный
1987	6,20	мезотрофный	2001	5,46	эвтрофный
1988	5,93	мезотрофный	2002	5,57	эвтрофный
1989	5,84	мезотрофный	2003	5,70	эвтрофный
1990	5,73	эвтрофный	2004	5,43	эвтрофный
1991	5,63	эвтрофный	2005	5,70	эвтрофный
1992	5,72	эвтрофный	2006	5,44	эвтрофный
1993	5,43	эвтрофный	2007	5,24	эвтрофный
1994	5,75	эвтрофный	2008	5,76	эвтрофный
1995	5,50	эвтрофный	2009	5,89	мезотрофный
1996	5,48	эвтрофный	2010	6,05	мезотрофный
1997	5,02	эвтрофный	2011	6,04	мезотрофный
1998	4,63	эвтрофный	-	-	-

тировочный, поскольку массив первичных данных для анализа вод восточной части Чудского озера невелик (отбор и анализ проб проводился в марте, как правило, на пяти станциях). Кроме того, по указанию автора метода необходимо уточнение и расширение предложенной им шкалы.

Аналогично были рассчитаны величины E_p для акватории озера Тайху, пробы из которого отбирались в течение года ежемесячно. Для расчетов величин E_1 были использованы средние концентрации фосфора фосфатов за период с января по март. (табл. 4 и рис. 1).

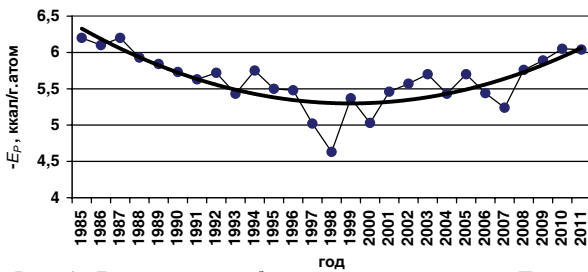


Рис. 1. Динамика трофического статуса озера Тайху (по величинам минимальных энергетических затрат E_p)

Линия тренда, приведенная на рис. 1, показывает, что с 1985 по 1998 гг. величина E_p плавно понижалась, после чего зафиксирован ее плавный подъем. Таким образом, трофический статус озера Тайху изменялся от мезотрофного до эвтрофного, а затем вновь переходил в мезотрофный статус.

Уже два десятка лет когда-то живописное озеро Тайху на востоке Китая страдает от разрушительного цветения водорослей, ставящего под угрозу питьевую воду миллионов. Сейчас Китай предпринимает шаги по восстановлению экологического баланса Тайху, что может стать уроком для других крупных озер по всему миру. С целью сокращения загрязнения и массивного поступления азота и фосфора – что для водорослей

все равно, что сырое мясо для пираний – власти вынудили сотни небольших химических и производственных предприятий возле Тайху закрыться или переместиться на север Цзянсу. Они также ввели жесткий мониторинг промышленных стоков предприятий, которым позволили остаться. Провинция возвела канализационные очистные сооружения на притоках Тайху и в их устьях производит выемку грунта для удаления богатых биогенами донных отложений. Как результат, концентрация биогенных элементов в толще воды озера начинает уменьшаться.

Выводы

1. Значения минимальных энергетических затрат E_p , вычисленных по формулам (2) и (3), являются универсальной мерой обеспеченности фитопланктона элементами минерального питания.
2. Необходимо расширение шкалы трофического статуса озер с целью ее применимости для различных географических зон.
3. Для корректной оценки трофического статуса восточной части Чудского озера необходимо проведение гидробиологического мониторинга с включением в него исследований по определению хлорофилла а.

Список литературы:

- [1] Атнашев В.Б., Федоров Ю.С., Соляная Б.И. Оценка состояния объектов окружающей среды в естественных и экстремальных условиях // Тез. докл. Всесоз конф. «Методология экологического нормирования». Харьков: ВНИИВО, ч. 2, 1990. – С. 6.
- [2] Буравлев Е.П., Клименко-Мешкова Н.А. Сопоставимый показатель антропогенного воздействия на атмосферный воздух и водный бассейн // Хим. Технология. – 1985, № 3. – С. 59–62.
- [3] Буравлев Е.П. Физико-химические аспекты оценки абиотической составляющей в воде Тез. докл. III Всесоюз. научн. конф. «Проблемы экологии Прибайкалья». Ч. 1. – Иркутск, 1988. – С. 6.
- [4] Волохонский А.Г. Структурные и энергетические аспекты проблемы дефицитности биогенных элементов // Экология. – 1973, вып. 2. – С. 5–11.
- [5] Дмитриев В.В. Экологическое нормирование состояния и антропогенных воздействий на природные экосистемы // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7, вып. 2. – 1994, № 14. – С. 60–70.
- [6] Дмитриев В.В. Диагностика и моделирование водных экосистем. – СПб.: СПбГУ, 1995. – С. 59.
- [7] Ивахненко А.Г., Светальский Б.К., Сарычев А.П. Объективный системный анализ и двухуровневый долгосрочный прогноз для экосистемы Каховского и Кременчугского водохранилищ // Автоматика. – 1984, № 2. – С. 30–41.
- [8] Михайловский Г.Е. Термодинамические аспекты системного подхода к экологии // Человек и биосфера. Устойчивость экологических систем. Вып. 2 – М.: МГУ, 1978. – С. 103–123.
- [9] Сиренко Л.А., Буравлев Е.П. Энтропийная оценка экологических факторов антропогенных воздействий на водоем // Автоматика. – 1987, № 1. – С. 67–69.
- [10] Фрумин Г.Т., Сусарева О.М., Баркан Л.В. Термодинамическая оценка состояния водных объектов. Тез. Докл. Всероссийского совещания «Экологические проблемы Севера Европейской территории России. 11–15 июня. – Апатиты, 1996. – С. 129–130.
- [11] Фрумин Г.Т. Оценка состояния водных объектов и экологическое нормирование. – СПб.: Синтез, 1998. – С. 33–42.
- [12] Фрумин Г.Т., Басова С.Л. Новый подход к оценке состояния водных объектов (на примере Невской губы) // Экологическая химия. Том 16. – 2007, вып. 1. – С. 1–8.
- [13] Цветкова Л.И., Алексеев М.И., Кармазинов Ф.В., Неверова-Дзюпик Е.В., Усанов Б.П., Жукова Л.И. Экология / Уч. для техн. вузов. – М.: Изд-во АСВ, СПб.: Химиздат, 2001. – 395–400.
- [14] Якушко О.Ф., Власов Б.П., Романов В.П., Гигевич Г.С., Карташевич З.К. Основные критерии оценки качества воды малых озер в условиях интенсивной хозяйственной деятельности // Труды V Всесоюзного гидрологического съезда. Том 5. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – С. 282–289.