

УДК 581.526.325

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ОЗЕР КАЗАХСТАНА

Г. Т. Фруммин, Ю. В. Крашановская

*Российский государственный гидрометеорологический университет*

Разработана методика прогнозирования трофического статуса озер по данным мониторинга в зимний период. Методика базируется на подходе А. Г. Волохонского, согласно которому значения минимальных энергетических затрат, вычисленных для виртуальной модели процесса вовлечения элементов минерального питания в клетки фитопланктона, являются универсальными критериями обеспеченности фитопланктона этими элементами. Выявлена статистически значимая однопараметрическая линейная зависимость между средними за год концентрациями фосфора общего ( $P_{\text{общ}}$ ) и значениями минимальных энергетических затрат ( $E_p$ ), характеризующими содержание фосфора минерального в феврале. Разработана классификация трофического статуса озер Казахстана в зависимости от значений минимальных энергетических затрат фосфора минерального в феврале.

**Ключевые слова:** озера Казахстана; евтрофирование; минимальные энергетические затраты; фосфор минеральный; фосфор общий; прогнозирование.

### **G. T. Frumin, Y. V. Krashanovskaya. PREDICTING THE TROPHIC STATUS OF SOME LAKES OF KAZAKHSTAN**

A method for predicting the lake trophic status relying on wintertime monitoring data was developed. The technique is based on A. G. Volokhonskii's approach, according to which the values of the minimum energy costs calculated for the virtual model of the process of involving mineral nutrients in phytoplankton cells are universal criteria of these nutrients' availability to phytoplankton. Statistically significant one-parameter linear dependence between the average annual concentration of total phosphorus ( $P_t$ ) and the values of minimum energy costs ( $E_p$ ), which characterize mineral phosphorus levels in February, was detected. A classification of the trophic status of lakes of Kazakhstan depending on the values of the minimum energy costs of mineral phosphorus in February was developed.

**Key words:** lakes of Kazakhstan; eutrophication; minimum energy costs; mineral phosphorus; total phosphorus; forecasting.

---

Согласно Водному кодексу Республики Казахстан (с изменениями и дополнениями по состоянию на 29.12.2014 г.), «Государственный мониторинг водных объектов представляет собой систему регулярных наблюдений за гидрологическими, гидрогеологическими,

гидрогеохимическими, санитарно-химическими, микробиологическими, паразитологическими, радиологическими и токсикологическими показателями их состояния, сбор, обработку и передачу полученной информации в целях своевременного выявления негативных

процессов, оценки и прогнозирования их развития, выработку рекомендаций по предотвращению вредных последствий и определению степени эффективности осуществляемых водохозяйственных мероприятий».

Следует отметить, что, как правило, на практике реализуются только две составляющие мониторинга (наблюдения и оценка).

Среди современных проблем водной экологии центральное место занимает проблема евтрофирования [Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990] (синонимы: евтрофикация, эвтрофирование, эвтрофикация). Согласно ГОСТу 17.1.1.01–77, «евтрофированием называется повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления биогенных элементов под действием антропогенных или естественных факторов». Международная организация по стандартизации предлагает иное определение: обогащение воды биогенными веществами, особенно азотом и фосфором, что ускоряет рост водорослей и высших форм растительной жизни.

Поскольку евтрофирование водоемов стало серьезной глобальной экологической проблемой, по линии ЮНЕСКО проводятся работы по мониторингу внутренних вод, контролю за евтрофированием водоемов земного шара.

В связи с изложенным цель данного исследования заключалась в разработке методики прогнозирования трофического статуса озер по данным мониторинга в зимний период.

## Материалы и методы исследования

Разработанная методика базируется на подходе А. Г. Волохонского, согласно которому значения минимальных энергетических затрат, вычисленных для виртуальной модели процесса вовлечения элементов минерального питания в клетки фитопланктона, являются универсальными критериями обеспеченности фитопланктона этими элементами [Волохонский, 1973].

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):

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

Величина  $E_i$  (ккал/моль) выражает количество энергии, необходимое для организации 1 моля 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  $\beta_i$  рассчитывается из следующего выражения:

$$\beta_i = C_{кл} / C_o \quad (2)$$

где  $C_{кл}$  – концентрация элемента в клетке;  $C_o$  – 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  $\beta$  для водорода и кислорода всегда меньше 1, эти элементы из рассмотрения исключены. Тот элемент, для которого  $\beta_i$  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  $C_c = 8 \times 10^4$  мг/л;  $C_n = 1 \times 10^4$  мг/л;  $C_p = 1 \times 10^3$  мг/л [Волохонский, 1973].

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 трофического статуса. 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 работе [Фруммин, Хуан, 2013] подход А. Г. Волохонского был использован для оценки трофического статуса акваторий Псковско-Чудского озерного комплекса и озера Тайху, расположенного в Китае.

Для оценки трофического статуса озер была использована классификация, разработанная OECD [Galvez-Cloutie, Sanchez, 2007] (табл. 1).

Первичные данные для анализа были заимствованы из ежегодников химической лаборатории государственного предприятия «Центр гидрометеорологического мониторинга» РГП Казгидромет, входящего в состав Министрства экологии и охраны окружающей среды Республики Казахстан (табл. 2). В этой

Таблица 1. Классификация трофического статуса озер по среднему за год содержанию фосфора общего

Трофический статус	Концентрация фосфора общего, мкг/л	Трофический статус	Концентрация фосфора общего, мкг/л
Ультраолиготрофный	<4	Евтрофный	35–100
Олиготрофный	<10	Гипертрофный	>100
Мезотрофный	10–35	-	-

Таблица 2. Распределение концентраций минерального и общего фосфора в некоторых озерах Казахстана

Озеро	Год	$P_{\text{мин}}, \text{мг} \times \text{дм}^{-3}$	$P_{\text{общ}}, \text{мкг/л}$	$E, \text{кДж/моль}$
Копа	2012	0,012	69,5	-27,57
Бурабай	2012	0,005	25,0	-29,71
Улькен Шабакты	2012	0,006	21,5	-29,29
Шортан	2012	0,008	25,3	-28,58
Зеренда	2012	0,007	38,5	-28,91
Карасу	2012	0,010	32,6	-28,03
Майбалык	2012	0,061	169	-23,64
Султанкельды	2012	0,010	49,7	-28,03
Копа	2011	0,025	77,0	-25,82
Улькен Шабакты	2011	0,007	20,0	-28,91
Майбалык	2011	0,083	184	-22,89
Султанкельды	2011	0,042	113	-24,52
Зеренда	2011	0,012	33,0	-27,57
Киши Шабакты	2011	0,010	62,0	-28,03
Боровое	2010	0,006	24,0	-29,29
Улькен Шабакты	2010	0,009	21,0	-28,28
Шортан	2010	0,014	30,0	-27,20
Копа	2009	0,008	36,0	-28,58
Боровое	2009	0,007	12,0	-28,91
Улькен Шабакты	2009	0,004	10,0	-30,25
Шортан	2009	0,004	13,0	-30,25
Малое Чебачье	2009	0,011	23,0	-27,78
Копа	2008	0,005	26,0	-29,71
Копа	2006	0,009	34,0	-28,28
Боровое	2006	0,010	12,0	-28,03
Улькен Шабакты	2006	0,006	12,0	-29,29
Копа	2005	0,010	44,0	-28,03
Боровое	2005	0,009	19,0	-28,28
Шортан	2005	0,011	23,0	-27,78

же таблице приведены величины  $E_T$ , рассчитанные по формулам (1) и (2). При этом формула (2) была преобразована нами таким образом, чтобы размерность величины  $E$  была выражена в кДж/моль (1 ккал = 4,184 кДж):

$$E_T = -5,607 \times \lg \beta_9 = -5,607 \times \lg (1000/C_0) \quad (3)$$

Для последующего анализа были использованы концентрации минерального фосфора в феврале и средние за год концентрации фосфора общего.

### Результаты и их обсуждение

По данным, приведенным в таблице 2, выявлена статистически значимая однопараметрическая линейная зависимость между средними за год концентрациями фосфора общего и значениями минимальных энергетических затрат,

характеризующими содержание фосфора минерального в феврале (см. также рис. 1):

$$P_{\text{общ}} = 668,2 + 22,32 \times E_p \quad (4)$$

$n = 29; r = 0,91; r^2 = 0,83; \sigma_{Y(X)} = 18,1;$   
 $F_p = 132,9; F_T = 4,2; F_p / F_T = 31,6.$

Здесь  $n$  – количество наблюдений;  $r$  – коэффициент корреляции, характеризующий тесноту связи между переменными;  $r^2$  – коэффициент детерминации, характеризующий объяснимую долю разброса;  $\sigma_{Y(X)}$  – стандартная ошибка;  $F_p$  и  $F_T$  – расчетное и табличное (при уровне значимости 95 %) значения критерия Фишера.

Согласно шкале Чеддока [Макарова, Трофимец, 2002] приведенное значение коэффициента корреляции свидетельствует о весьма высокой тесноте связи между  $P_{\text{общ}}$  и  $E$ . Кроме того, как следует из приведенных статистических

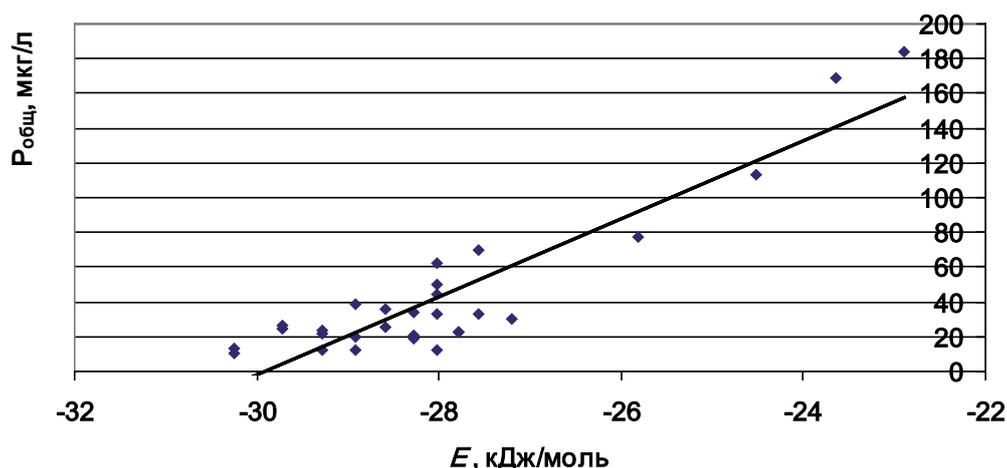


Рис. 1. Зависимость средних за год концентраций фосфора общего от величин минимальных энергетических затрат



Рис. 2. Алгоритм прогнозирования трофического статуса озер Казахстана

Таблица 3. Классификация трофического статуса озер Казахстана

Трофический статус	$E_p$ , кДж/моль	$P_{мин}$ , мг/л (в феврале)
Ультраолиготрофный	$< -29,75$	$< 0,005$
Олиготрофный	$-29,75 \div -29,48$	$0,005-0,006$
Мезотрофный	$-29,48 \div -28,36$	$0,006-0,009$
Евтрофный	$-28,36 \div -25,45$	$0,009-0,029$
Гипертрофный	$> -25,45$	$> 0,029$

характеристик, аналитическое уравнение (4) адекватно ( $F_p > F_T$ ) и может быть использовано для предсказания средних за год концентраций фосфора общего, так как  $F_p / F_T > 4$  [Дрейпер, Смит, 1973].

На основе таблицы 1 и формулы (4) была разработана классификация трофического статуса озер Казахстана в зависимости от значений минимальных энергетических затрат фосфора минерального в феврале (табл. 3).

Из данных, приведенных в таблице 3, следует, что если в феврале концентрации фосфора минерального меньше 0,005 мг/л, то прогнозируемый трофический статус озера будет олиготрофным. Если в феврале концентрации

фосфора минерального будут варьировать от 0,009 до 0,029 мг/л, то прогнозируемый трофический статус озера будет евтрофным.

Прогнозирование трофического статуса озер Казахстана проводится на основе алгоритма, приведенного на рисунке 2.

## Вывод

Линейная зависимость между средними за год концентрациями фосфора общего и значениями содержания фосфора минерального в феврале может быть использована для краткосрочного прогнозирования трофического статуса озер Казахстана.

## Литература

Волохонский А. Г. Структурные и энергетические аспекты проблемы дефицитности биогенных элементов // Экология. 1973, № 2. С. 5–11.

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.

Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 252 с.

Фрумин Г. Т., Хуан Ж.-Ж. Термодинамическая оценка состояния водных объектов // Общество. Среда. Развитие. 2013, № 1. С. 232–235.

Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного евтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 279 с.

Galvez-Cloutier R., Sanchez M. Trophic Status Evaluation for 154 Lakes in Quebec, Canada. Monitoring and Recommendations // Water Qual. Res. J. Canada, 2007. Vol. 42, No 4. P. 252–268.

Поступила в редакцию 17.12.2014

## References

Dreiper N., Smit G. Prikladnoi regressionnyi analiz [Applied regression analysis]. Moscow: Statistika, 1973. 392 p.

Frumin G. T., Khuan Zh.-Zh. Termodinamicheskaya otsenka sostoyaniya vodnykh ob'ektov [Thermodynamic assessment of the water bodies]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie* [Society. Environment. Development]. 2013, No 1. P. 232–235.

Makarova N. V., Trofimets V. Ya. Statistika v Excel [Statistics in Excel]. Moscow: Finansy i statistika, 2002. 252 p.

Volokhonskii A. G. Strukturnye i energeticheskie aspekty problemy defitsitnosti biogennykh elementov [Structural and energetic aspects of the problem of

deficiency of biogenic elements]. *Ekologiya* [Ecology]. 1973, No 2. P. 5–11.

Khenderson-Sellers B., Marklend Kh. R. Umirayushchie ozera. Prichiny i kontrol' antropogennogo evtrofirovaniya [Dying lakes. The causes and control of anthropogenic eutrophication]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 279 p.

Galvez-Cloutier R., Sanchez M. Trophic Status Evaluation for 154 Lakes in Quebec, Canada. Monitoring and Recommendations. *Water Qual. Res. J. Canada*, 2007. Vol. 42, No 4. P. 252–268.

Received December 17, 2014

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Фрумин Григорий Тевелевич

профессор кафедры экологии, д. х. н.  
Российский государственный гидрометеорологический университет  
Малоохтинский проспект, 98, Санкт-Петербург,  
Россия, 195196  
эл. почта: gfrumin@mail.ru

### Крашановская Юлия Викторовна

аспирант кафедры экологии  
Российский государственный гидрометеорологический университет  
Малоохтинский проспект, 98, Санкт-Петербург,  
Россия, 195196  
эл. почта: yulia3885@gmail.com

## CONTRIBUTORS:

### Frumin, Grigory

Russian State Hydrometeorological University  
98 Maloohhtinsky Pr., 195196 St. Petersburg, Russia  
e-mail: gfrumin@mail.ru

### Krashanovskaya, Yulia

Russian State Hydrometeorological University  
98 Maloohhtinsky Pr., 195196 St. Petersburg, Russia  
e-mail: yulia3885@gmail.com