

Ану МИЛИУС

ПОКАЗАТЕЛИ ЭВТРОФИРОВАНИЯ И ИНДЕКСЫ ТРОФНОСТИ МАЛЫХ ОЗЕР ЭСТОНИИ

Антропогенное эвтрофирование озер за последние десятилетия стало главной проблемой в лимнологии. В озерах всего мира происходят характерные для этого процесса изменения, которые в большинстве случаев (в т. н. фитопланктонных озерах прежде всего) выражаются в резком возрастании биомассы фитопланктона, нарушении газового режима и в ухудшении качества воды. Главной причиной эвтрофирования является увеличение концентрации биогенных элементов в воде в результате их усиленного поступления в водоем в связи с интенсификацией хозяйственной деятельности человека на водосборе озер. Антропогенное эвтрофирование быстро и глубоко изменяет экосистему озера, ее структуру и функцию. Олиготрофные водоемы превращаются в эвтрофные, а эвтрофные — в гипертрофные. Достижения лимнологии последних лет (определение фосфорной нагрузки, установление корреляции между отдельными показателями эвтрофирования) позволяют достаточно точно определять трофический статус водоема и прогнозировать те изменения, которые могут возникнуть при определенных показателях возрастающей биогенной нагрузки, связанных с влиянием антропогенных факторов. В настоящем сообщении анализируются корреляционные связи между такими показателями эвтрофирования как содержание хлорофилла *a* в фитопланктоне, прозрачность воды и концентрация общего фосфора в водоеме. Исходя из данных об этих связях и параметрах, предлагается трофическая классификация водоемов на основе индексов трофности.

Материал и методика

Исследовали 56 разнотипных малых озер Южной и Центральной Эстонии, причем 25 из них в течение двух или трех лет. Пробы (370) из поверхностного слоя воды (1 м) брали во время вегетационного периода (с мая по октябрь) 1978, 1979 и 1981 гг. батометром Руттнера. Прозрачность воды измеряли по диску Секки. Содержание хлорофилла *a* (поправка на феопигменты) определяли спектрофотометрически в метаноловом экстракте (Talling, 1969), концентрацию его рассчитывали по формулам А. Ф. Х. Маркера (Marker, 1972). Концентрацию общего фосфора определяли колориметрически несколько модифицировано по общепринятой в гидрохимии методике с окислением персульфатом калия (Алекин и др., 1973). Данные (средние значения вегетационного периода) обрабатывали с помощью регрессионного анализа.

Результаты и их обсуждение

1. Связь между прозрачностью воды и содержанием хлорофилла. Следствием эвтрофирования является уменьшение прозрачности водоема.

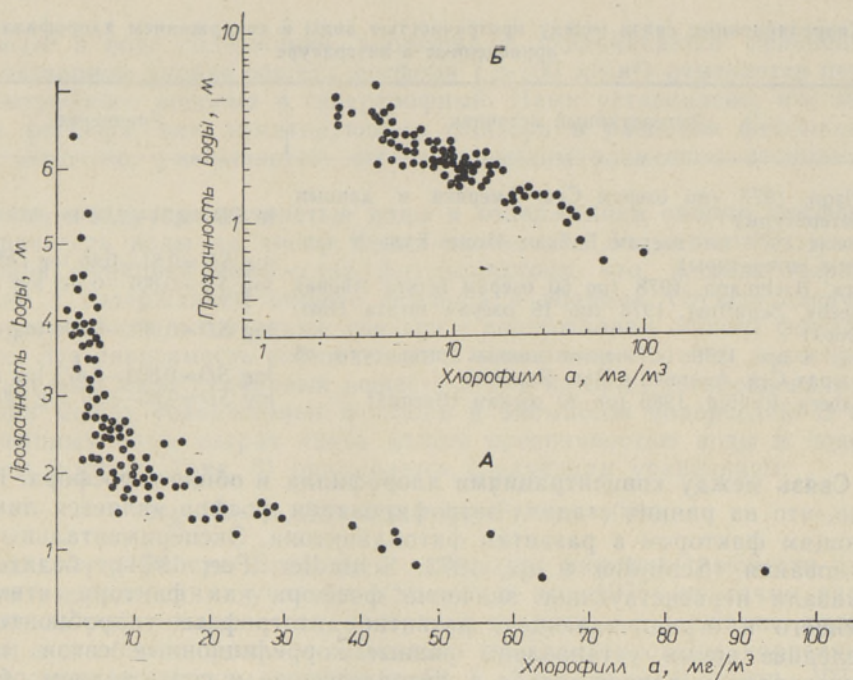


Рис. 1. Корреляционная связь между концентрацией хлорофилла *a* и прозрачностью воды для озер Эстонии. А — в линейном масштабе, Б — в логарифмическом масштабе.

Этот показатель, измеренный по диску Секки, служит простым и убедительным доказательством содержания взвешенного органического вещества в воде, в состав которого входят и планктонные организмы. Общее содержание планктона, в свою очередь, зависит непосредственно от развития фитопланктона, количество которого оценивается по содержанию в сестоне хлорофилла *a*. Сопоставление данных о прозрачности воды по диску Секки с данными о содержании хлорофилла *a* в фитопланктоне впервые проведено для оз. Вашингтон (Edmondson, 1972), при этом установлена обратная связь между этими показателями. Далее, такая же зависимость установлена между названными показателями и для других озер США (Bachmann, Jones, 1974; Carlson, 1977; Jones, Bachmann, 1978a, б; Brezonik, 1978; Jones и др., 1979), а также Канады (Dillon, Rigler, 1975), Советского Союза (Бульон, 1977, 1978), в том числе и для малых озер Эстонии (Милиус, 1980), и Швеции (Forsberg, Ryding, 1980).

Обратную связь между прозрачностью воды и содержанием хлорофилла *a* в фитопланктоне в логарифмическом масштабе (рис. 1, Б) можно выразить уравнением:

$$\log SD = 0,8417 - 0,5001 \log chl, r = -0,91,$$

где *SD* — прозрачность, м; *chl* — содержание хлорофилла, мг/м³. В анализ не включены данные по озерам дистрофного типа, поскольку в них нарушено равновесие между названными показателями. Приведенное уравнение относительно мало отличается от уравнений, взятых из литературы (таблица), по которым прозрачность воды при концентрации хлорофилла 10 мг/м³ колеблется незначительно (от 1,8 до 2,25 м). Исключение составляет уравнение Карлсона (Carlson, 1977), согласно которому прозрачность воды при упомянутой концентрации хлорофилла слишком большая (3,9 м).

Корреляционные связи между прозрачностью воды и содержанием хлорофилла *a*, приведенные в литературе

Литературный источник	Уравнение
Carlson, 1977 (по озерам Сев. Америки и данным литературы)	$\ln SD = 2,04 - 0,68 \ln chl$
Бульон, 1977 (по озерам Байкал, Иссык-Куль и данным литературы)	$\log SD = 0,81 - 0,46 \log chl$
Jones, Bachmann, 1978 (по 50 озерам штата Айова)	$\log SD = 0,807 - 0,549 \log chl$
Oglesby, Schaffner, 1978 (по 16 озерам штата Нью-Йорк)	$\log SD = 0,961 - 0,606 \log chl$
Jones и др., 1979 (на основе данных литературы об озерах Сев. Америки и Зап. Европы)	$\log SD = 0,803 - 0,473 \log chl$
Forsberg, Ryding, 1980 (по 30 озерам Швеции)	$\log SD = 0,85 - 0,57 \log chl$

2. Связь между концентрациями хлорофилла и общего фосфора. Известно, что на ранних стадиях эвтрофирования фосфор является лимитирующим фактором в развитии фитопланктона. Экспериментальные исследования (Schindler и др., 1973; Schindler, Fee, 1974) убедительно доказали первенствующее значение фосфора как фактора, стимулирующего и ограничивающего развитие автотрофных гидробионтов. В последнее время установлены разные корреляционные связи между концентрацией хлорофилла *a* в фитопланктоне и содержанием общего фосфора в водоеме (Sakamoto, 1966; Brydges, 1971; Edmondson, 1972; Dillon, Rigler, 1974; Jones, Bachmann, 1976; Carlson, 1977; Oglesby, Schaffner, 1978; Schindler, 1978; LaBaugh, 1979; Hickman, 1980).

Связь между содержанием хлорофилла *a* и общего фосфора (на рис. 2 для малых озер Эстонии) можно выразить следующим регрессионным уравнением:

$$\log chl = 1,544 \log P - 1,511, r = 0,83,$$

где *chl* и *P* — концентрации хлорофилла и общего фосфора, мг/м³.

Как видно по рис. 2, при концентрации общего фосфора более

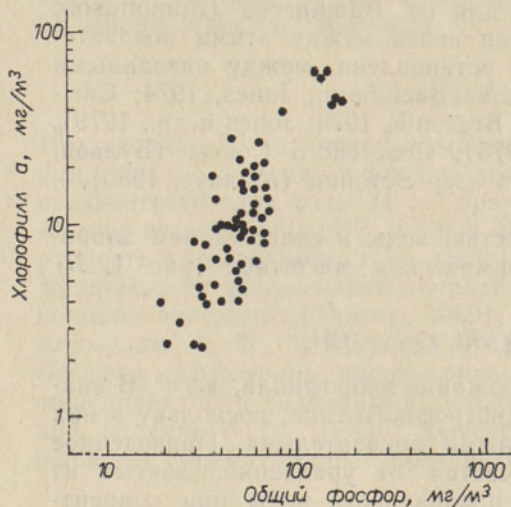


Рис. 2. Корреляционная связь между концентрациями хлорофилла и общего фосфора для озер Эстонии.

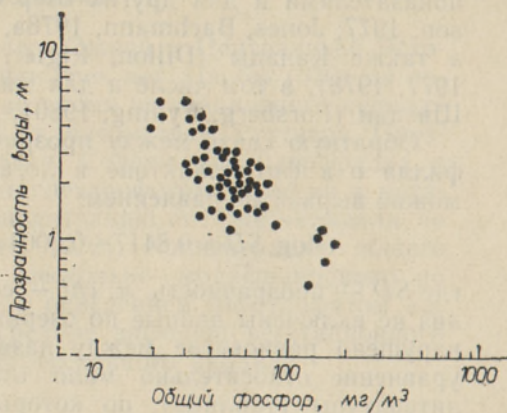


Рис. 3. Корреляционная связь между прозрачностью воды и концентрацией общего фосфора для озер Эстонии.

100 мг/м³ в воде содержание хлорофилла увеличивается нелинейно. При названном уровне общего фосфора (>100 мг/м³) отмечается переход эвтрофного водоема в гипертрофный. Нами установлено, что значение фосфора, как лимитирующего фактора в развитии фитопланктона, вероятно, уменьшается; ограничивающим элементом становится азот.

3. Связь между прозрачностью воды и содержанием общего фосфора. Прозрачность воды по диску Секки является в большинстве случаев реальной функцией количества фитопланктона, что, в свою очередь, связано с содержанием общего фосфора в водоеме. Отсюда следует, что прозрачность воды также связана с содержанием общего фосфора в воде. Эта зависимость состоятельна в отношении тех озер, в которых относительно мало гуминовых веществ и для которых установлена корреляция между содержанием фосфора и биомассой водорослей. В исследованных нами озерах связь между прозрачностью воды и содержанием фосфора (рис. 3) описывается следующим уравнением:

$$\log SD = 1,822 - 0,913 \log P, \quad r = -0,84.$$

4. Индексы трофности. Впервые в литературе индексы трофности приведены американскими учеными (Shapiro и др., 1975) по таким параметрам эвтрофирования как прозрачность воды, содержание хлорофилла *a* и общего фосфора. Детально проанализированы корреляционные связи и индексы трофности Р. Е. Карлсоном (Carlson, 1977). Шкала трофности Карлсона основывается на данных о прозрачности воды, которой соответствует определенный уровень биомассы фитопланктона. Такие же параметры эвтрофирования использовали ранее (Walker, 1979).

Наша шкала трофности основывается на данных о биомассе фитопланктона, определенной по содержанию хлорофилла *a*, так как этот показатель широко используется в качестве оценки биомассы водорослей в водоемах (по нашим данным, для малых озер Эстонии корреляция между биомассой и хлорофиллом тесная: $r = 0,86$). На основе классификации трофности озер по содержанию хлорофилла фитопланктона в малых озерах Эстонии (Милиус, 1981) нами был выведен индекс трофности: с увеличением биомассы фитопланктона как критерия в два раза индекс трофности увеличивается на 10 единиц. Индекс трофности равен нулю при концентрации хлорофилла 0,25 мг/м³ (почти не встречающаяся концентрация во время вегетационного периода в малых озерах Эстонии), а индексу 100 соответствует концентрация хлорофилла 256 мг/м³, это максимальное содержание хлорофилла установлено нами только один раз в гипертрофном озере. Индекс трофности по содержанию хлорофилла (индекс хлорофилла — I_{chl}) хорошо аппроксимируется уравнением:

$$I_{chl} = 20,0 + 33,3 \log chl.$$

Исходя из статистических связей между прозрачностью воды и содержанием хлорофилла, а также между содержаниями хлорофилла и общего фосфора, выведены индексы трофности, основывающиеся на данных о прозрачности воды и о содержании общего фосфора в водоеме:

$$I_{SD} = 76,1 - 66,7 \log SD,$$

$$I_P = -20,0 + 40,9 \log P,$$

где I_{SD} , I_P — соответствующие индексы трофности.

5. Применение индексов трофности. Как видно по рис. 4, 5 и 6, где представлены взаимосвязи индексов трофности, вычисленных по соот-

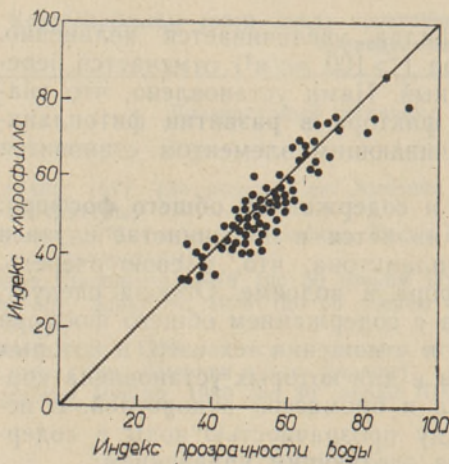


Рис. 4. Связь между индексами хлорофилла и прозрачности воды.

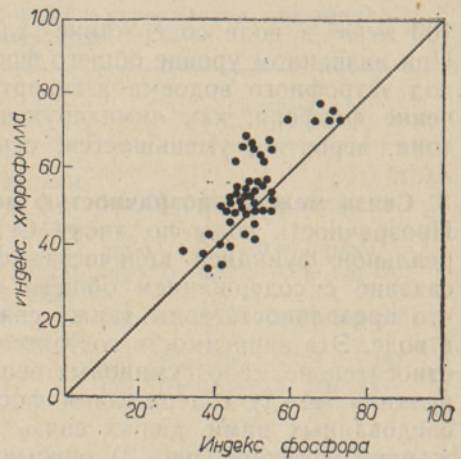


Рис. 5. Связь между индексами хлорофилла и фосфора.

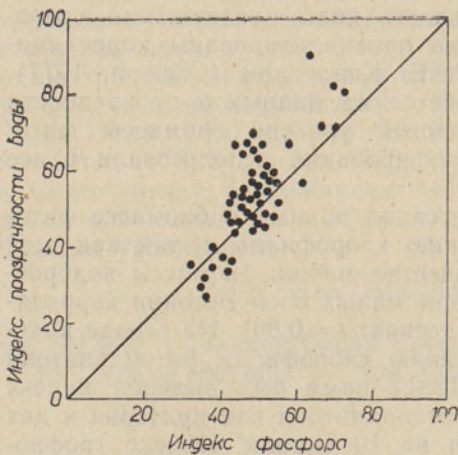


Рис. 6. Связь между индексами фосфора и прозрачности воды.

ветствующим данным для обследованных озер, наилучшая связь установлена между индексами трофности по прозрачности воды и содержанию хлорофилла.

Прозрачность воды давно и широко используется для оценки уровня трофности водоема, несмотря на недостатки этого показателя. Следует учесть, что данные о прозрачности воды по диску Секки не отражают степени трофности тех озер, где много взвеси непланктонного происхождения или где вода сильно окрашена гуминовыми веществами. Противоречие возникает между индексами прозрачности воды и содержания хлорофилла при крайне чистой

и содержащей мало планктона воде — прозрачность здесь чрезвычайно большая. Благодаря простоте измерения прозрачности воды, эти данные могут быть использованы в дополнение к другим показателям при оценке уровня трофности.

Данные о содержании хлорофилла лишены тех ошибок, которые могут иметь место при измерениях прозрачности воды, особенно, если концентрация хлорофилла определяется с поправкой на продукты распада — феопигменты. Содержание хлорофилла *a* при массовом развитии синезеленых не отражает истинной биомассы водорослей, в таком случае следует определить содержание других растительных пигментов — фикоэритринов (Watanabe, 1977) — или установить общую биомассу водорослей. Истинный индекс фосфора можно получить в тех случаях, когда фосфор является основным фактором, лимитирующим рост водорослей. Как уже было сказано, при концентрации 100 мг/м^3 фосфор является основным контролирующим компонентом питания водорослей, так как регулирует продукционно-биологические процессы в водоемах. В высокопродуктивных озерах фактором, огра-

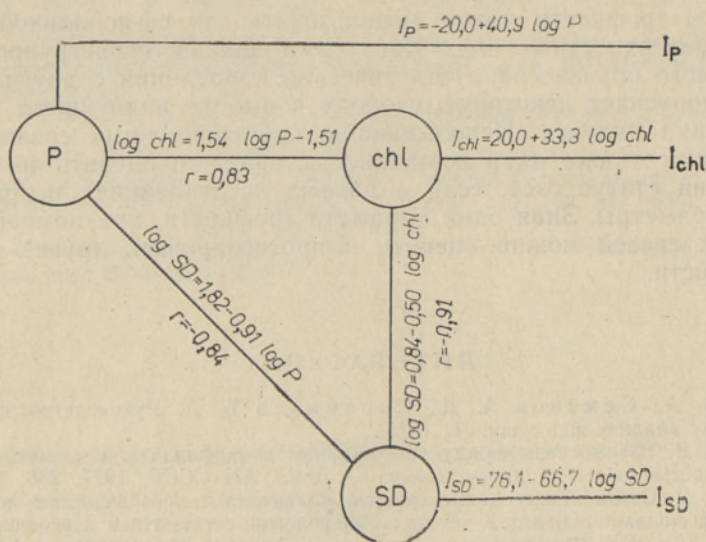


Рис. 7. Предварительная эмпирическая модель взаимосвязи параметров трофического статуса озер.

ничивающим рост фитопланктонных автотрофов, оказался азот (Forsberg, Ryding, 1980). Кроме азота продукцию фитопланктона в данной экосистеме могут лимитировать и некоторые физические факторы, например, свет. Известно также, что в водоемах с высоким содержанием гуминовых веществ некоторая часть фосфора связана с этими органическими веществами, и индекс фосфора в таком случае не отражает степени трофности озер.

По предварительной эмпирической модели (рис. 7) взаимоотношений параметров трофического статуса Эстонии и индексов трофности, выведенных из этих корреляционных связей, разницы в значениях индексов обусловлены ошибками определения показателей трофности, а также ошибками модели. Последние обусловлены факторами, которые не были учтены при выявлении корреляционных связей. Детального исследования требуют озера, в которых вода коричневая. Для данных по этим озерам надо ввести поправочный коэффициент на индекс прозрачности воды на основе статистической связи используемых параметров. Также необходимо исследовать связь между содержанием хлорофилла и фосфора в водоемах, где лимитирующим элементом является азот.

Если величины найденных индексов трофности близки, то было бы справедливо определить среднюю трех индексов

$$(I_{SD} + I_{chl} + I_P) : 3 = I.$$

При использовании средних значений влияние ошибок отдельных проб и измерений уменьшается. В случае отклонения значений индекса фосфора от значений других индексов использование средней нецелесообразно. Для многих озер индекс фосфора меньше, чем индексы хлорофилла и прозрачности воды.

Полученная нами трофическая шкала — цифровая, но в то же время она отражает и терминологию. Она хорошо согласуется с общей системой трофности (олиготрофная, мезотрофная, эвтрофная) и сохраняет основные группы, которые соответствуют существующей концепции о классах трофности. Значения индексов для наших озер колеблются от 30 до 85 на этой шкале трофности.

Индексы трофности можно использовать для региональной классификации поверхностных вод. Хотя сама шкала сконструирована на основе одного показателя, статистическая корреляция с другими параметрами допускает некоторую свободу в выборе наилучшего для данной ситуации индекса. Использование корреляционных связей между показателями также дает возможность надежно оценить и сравнить трофический статус озер, если в разных исследованиях используются разные параметры. Зная один параметр трофности, при помощи корреляционных связей можно оценить и прогнозировать другие критерии его трофности.

ЛИТЕРАТУРА

- Алекин О. А., Семенов А. Д., Скопинцев Б. А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л., 1975.
- Бульон В. В. Взаимосвязь между содержанием хлорофилла *a* в планктоне и прозрачностью воды по диску Секки. — Докл. АН СССР, 1977, 236, 505—508.
- Бульон В. В. Связь между концентрацией планктона и прозрачностью воды в озерах и водохранилищах. — В кн.: Морфология, систематика и эволюция животных. Л., 1978, 49—50.
- Милиус А. Связь между прозрачностью воды и содержанием хлорофилла *a* в малых озерах Эстонии. — Изв. АН ЭССР. Биол., 1980, 29, 148—150.
- Милиус А. Содержание хлорофилла *a* фитопланктона в малых разнотипных озерах Эстонии. — Изв. АН ЭССР. Биол., 1981, 30, 148—157.
- Bachmann, R. W., Jones, J. R. Phosphorus inputs and algal blooms in lakes. — Iowa State J. Res., 1974, 49, 155—160.
- Brezonik, P. L. Effect of organic color and turbidity of Secchi disk transparency. — J. Fish. Res. Board Can., 1978, 35, 1410—1416.
- Brydges, T. G. Chlorophyll *a*-total phosphorus relationships in Lake Erie. — Proc. 14th Conf. Great Lakes Res., 1971, 185—190.
- Carlson, R. E. A trophic state index for lakes. — Limnol. Oceanogr., 1977, 22, 361—369.
- Dillon, P. J., Rigler, F. M. A simple method for predicting the capacity of a lake for development based a lake trophic status. — J. Fish. Res. Board Can., 1975, 32, 1519—1531.
- Edmondson, W. T. Nutrients and phytoplankton in Lake Washington. — Special Symposia, Amer. Soc. Limnol. Oceanogr., 1972, 1, 172—193.
- Forsberg, C., Ryding, S.-O. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. — Arch. Hydrobiol., 1980, 89, 189—207.
- Hickman, M. Phosphorus, chlorophyll and eutrophic lakes. — Arch. Hydrobiol., 1980, 88, 137—145.
- Jones, J. R., Bachmann, R. W. Prediction of phosphorus and chlorophyll levels in lakes. — J. Water Pollut. Contr. Fed., 1976, 48, 2176—2182.
- Jones, J. R., Bachmann, R. W. Trophic status of Iowa lakes in relation to origin and glacial geology. — Hydrobiol., 1978a, 57, 267—273.
- Jones, J. R., Bachmann, R. W. A survey of water transparency in Iowa lakes. — Proc. Iowa Acad. Sci., 1978b, 85, 6—9.
- Jones, R. A., Rast, W., Lee, G. F. Relationship between summer mean and maximum chlorophyll *a* concentrations in lakes. — Environ. Sci. Technol., 1979, 13, 869—870.
- LaBaugh, J. W. Chlorophyll prediction models and changes in assimilation numbers in Spruce Knob Lake, West Virginia. — Arch. Hydrobiol., 1979, 87, 178—197.
- Marker, A. F. H. The use of acetone and methanol in the estimation of chlorophyll in the presence of phaeophytin. — Freshwater Biol., 1972, 2, 361—385.
- Oglesby, R. T., Schaffner, W. R. Phosphorus loadings to lakes and some of their responses. Part 2. Regression models of summer phytoplankton standing crops, winter total P, and transparency of New York lakes with known phosphorus loadings. — Limnol. Oceanogr., 1978, 23, 135—145.
- Sakamoto, M. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. — Arch. Hydrobiol., 1966, 62, 1—28.
- Schindler, D. W. Factors regulating phytoplankton production and standing crop in the world's freshwaters. — Limnol. Oceanogr., 1978, 23, 478—486.
- Schindler, D. W., Fee, F. J. Experimental Lakes Area: Whole-lake experiments in eutrophication. — J. Fish. Res. Board Can., 1974, 31, 937—953.
- Schindler, D. W., Kling, H., Schmidt, R. V. et al. Eutrophication of Lake 227 by addition of phosphate and nitrate: the second, third, and fourth years of enrichment, 1970, 1971 and 1972. — J. Fish. Res. Board Can., 1973, 30, 10.
- Shapiro, J., Lindquist, J. B., Carlson, R. E. Involving the public in limnology —

an approach to communication. — Verh. Intern. Verein. Limnol., 1975, 19, 866—874.

Talling, J. E. Sampling techniques and methods for estimating quantity of biomass: general outline of spectrophotometric methods. — In: IBP Handbook, 12. Oxford, 1969, 22—24.

Walker, W. W. Use of hypolimnetic oxygen depletion rate as a trophic state index for lakes. — Water Res., 1979, 15, 1463—1470.

Watanabe, M. E. Phycoerythrin in the deeper water layer of a stratified eutrophic lake an application of bile pigment in determining the standing crop of blue-green algae. — Int. Rev. gesamt. Hydrobiol., 1977, 62, 549—556.

*Институт зоологии и ботаники
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию
7/1 1982

Anu MILIUS

EESTI VÄIKEJÄRVEDE EUTROFEERUMISNÄITAJAD JA TROOFSUSINDEKSID

Artiklis on esitatud fütoplanktoni klorofüllü *a* sisalduse, vee läbipaistvuse ja üldfosfori-
sisalduse vahelised korrelatiivsed seosed. Materjal on kogutud Lõuna- ja Kesk-Eesti eri
tüüpi järvedest 1978., 1979. ja 1981. aastal vegetatsiooniperioodi jooksul. Üldse uuriti
56 järve, kusjuures 25 järve veeproove on analüüsitud kahel või kõigil kolmel aastal
(370 veeproovi). Andmete (vegetatsiooniperioodi keskmised väärtused) töötlemisel raken-
dati regressioonanalüüsi. Töös on esitatud nimetatud eutrofeerumisnäitajate vahelised
regressioonivõrrandid, kusjuures korrelatsioonikoefitsientide väärtused on suured. Tuvastatud statistilistest seostest ja parameetritest on tuletatud vastavad troofsusindeksid ja nende alusel esitatud veekogude troofsuse klassifikatsioon. Klorofüllü indeks on kon-
struueeritud (kontsentratsiooni kahekordistudes suureneb indeks 10 ühiku võrra), läbipaistvus- ja fosforiindeks on tuletatud vastavatest statistilistest seostest klorofüllü *a* sisaldusega. Troofsusindeksite skaala on nii arvuline kui ka terminoloogiline (säilivad põhilised troofsusklassid), uuritud järved asuvad skaalas vahemikus 30—85. On esitatud kõigi uuritud järvede kolme troofsusindeksi omavahelised seosed.

Anu MILIUS

EUTROPHICATION PARAMETERS AND TROPHIC STATE INDICES IN SMALL ESTONIAN LAKES

Correlation between the eutrophication parameters — chlorophyll *a* concentration, transparency and total phosphorus concentration — are presented concerning various types of 56 small Estonian lakes (Figs 1, 2 and 3). The data were collected during the vegetation period in 1978, 1979 and 1981 from the lakes of southern and central Estonia (370 water samples). The regression equations were derived between the obtained parameters. They all showed high correlation coefficients. Chlorophyll *a* content as algal biomass served as the basis for the index. If the concentration doubled, the scale increased for 10 index units with each increase. The scale of the trophic state index for lakes is numerical. It incorporates all the investigated lakes in a scale from 30 to 85. The other trophic criteria (transparency, phosphorus) were calculated by means of established relationships. The interrelations of trophic state indices are presented in Figs 4, 5 and 6.