

ФИТОПЛАНКТОН, ФИТОБЕНТОС,
ФИТОПЕРИФИТОН

УДК 556.11:546.18+547.979.7]:556.113.4(470.22)

**ЗАВИСИМОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *a*
ОТ СОДЕРЖАНИЯ ОБЩЕГО ФОСФОРА В ВОДОЕМАХ
С ПОВЫШЕННОЙ ЦВЕТНОСТЬЮ ВОДЫ**

© 2022 г. Н. М. Калинкина^а, *, Е. В. Теканова^а

^аФедеральный исследовательский центр “Карельский научный центр Российской академии наук”,
Институт водных проблем Севера, Петрозаводск, Россия

*e-mail: cerioda@mail.ru

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 14.03.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

На примере озер Карелии показано, что по мере повышения цветности воды увеличение содержания общего фосфора в воде приводит к более медленному нарастанию концентрации хлорофилла *a* по сравнению с общепринятой зависимостью Диллона–Риглера. Это объясняется тем, что значительная часть фосфора связана с железом в комплексах с гумусовыми веществами, что косвенно подтверждается достоверной зависимостью концентрации общего фосфора от цветности воды. Впервые предложено уравнение для расчета концентрации хлорофилла *a* по содержанию общего фосфора для водоемов Карелии, не затронутых антропогенной деятельностью. Завышение реального трофического статуса высокоцветных вод, определенного по содержанию общего фосфора, может привести к неоправданно высокой допустимой антропогенной фосфорной нагрузке на водоемы.

Ключевые слова: озера Карелии, продуктивность водоема, хлорофилл *a*, общий фосфор, цветность воды

DOI: 10.31857/S0320965222050138

ВВЕДЕНИЕ

Генеральные зависимости между гидрофизическими, химическими и биологическими параметрами водных экосистем к настоящему времени хорошо изучены. Однако, они определены для большого количества водоемов из разных географических зон и конкретная ситуация или геохимические особенности региона, например цветность, мутность воды (Carlson, Havens, 2005) и соотношение биогенных элементов (Трифонов, 1993), могут модифицировать зависимости между содержанием фосфора, прозрачностью и биологическими показателями.

Геохимические особенности Карельского региона определяют сток в водоемы аллохтонного органического вещества (ОВ) с заболоченных водосборов, которое на 90% состоит из гумусовых веществ (Зобкова и др., 2015). Фосфор поступает в водоемы преимущественно в составе гумусовых веществ в связанной с железом форме (Lozovik, 2013). Характерная черта большинства озер – повышенная цветность воды. Кроме того, для высокоцветных вод Карелии отмечено несоответствие между концентрацией общего фосфора и уров-

нем трофии. В этом случае содержание фосфора соответствует уровню мезотрофных водоемов, а другие показатели продуктивности остаются в пределах олиготрофии (Lozovik, 2013). Эти особенности наряду с низкой температурой воды определяют невысокий уровень развития биоты в большинстве озер Карелии (Озера..., 2013).

На примере Онежского озера показано, что в условиях потепления климата возросло поступление в водоем аллохтонных веществ, в том числе, гумусовых. Это привело к возрастанию цветности воды, концентрации железа, общего фосфора и углекислого газа (Kalinkina et al., 2020). В связи с этим важно получить представление об особенностях формирования продуктивности водоемов при повышении цветности воды в современных условиях потепления климата.

Цель работы – выявить зависимости продуктивности не испытывающих антропогенную нагрузку озер Карелии с разной цветностью воды от содержания в воде общего фосфора.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на разнотипных водоемах Карелии (Онежское озеро, Выгозерское водохранилище, озера Мунозеро и Урозера) в

Сокращения: ОВ – органические вещества; Хл *a* – хлорофилл *a*; *n* – объем выборки.

Таблица 1. Цветность воды, концентрации хлорофилла *a* (Хл *a*) и общего фосфора (ТР) в изученных водоемах Карелии

Водоем	<i>n</i>	COL, град	ТР, мкг/л	Хл <i>a</i> , мкг/л
оз. Урозеро	3	5	4	1.1
оз. Мунозеро				
северный плес	3	11	8	1.5
южный плес	3	12	11	2.5
Онежское озеро				
центральный плес	9	31 ± 3	9 ± 1	2.3 ± 0.2
Петрозаводская губа	7	43 ± 2	13 ± 1	3.3 ± 0.4
Кондопожская губа	12	43 ± 1	28 ± 2	10.1 ± 1.0
Выгозерское водохранилище	6	84 ± 6	21 ± 1	4.6 ± 0.9

Примечание. COL – цветность воды; *n* – объем выборки.

летний период. Все данные получены для поверхностного слоя воды. В качестве показателя продуктивности водоема измеряли концентрацию Хл *a* спектрофотометрическим методом при длинах волн $\lambda = 663$ нм, $\lambda = 645$ нм, $\lambda = 630$ нм (SCOR-UNESCO..., 1966). Кроме того, в работе использовали данные по цветности воды (платиново-кобальтовая шкала) и содержанию общего фосфора, полученные в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, и ранее опубликованные (Теканова и др., 2011; Сабылина, Икко, 2019; Сабылина и др., 2020; Kalinkina et al., 2020). Цветность воды определяли спектрофотометрическим методом при длине волны $\lambda = 410$ нм, содержание общего фосфора – методом персульфатного окисления. Зависимости концентрации Хл *a* от фосфора в озерах Карелии изучали на основе данных параллельных измерений в водоемах с разным содержанием общего фосфора. Для расчетов использовали два массива данных. В первую группу вошли незагрязненные или с незначительной антропогенной нагрузкой водоемы (Урозеро, Мунозеро, Петрозаводская губа и центральный район Онежского озера, Выгозерское водохранилище), во вторую группу – Кондопожская губа Онежского озера, где расположены форелевые хозяйства (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ данных по незагрязненным озерам выявил значимую зависимость содержания в воде Хл *a* от концентрации общего фосфора (рис. 1а). Коэффициент ранговой корреляции Спирмена – 0.87 ($n = 31$, $p < 0.05$). Эта зависимость описана уравнением (1):

$$Chl = (0.22 \pm 0.07) TP^{(0.97 \pm 0.11)}, \quad (1)$$

где *Chl* – концентрация Хл *a* (мкг/л), ТР – концентрация общего фосфора (мкг/л).

Полученный нами в уравнении (1) показатель степени оказался почти в 2 раза ниже, чем в классическом уравнении (2) Диллона–Риглера (Dillon, Rigler, 1974). Показатель степени в уравнении Диллона–Риглера (2) находится за пределами доверительного интервала для показателя степени в уравнении (1).

$$Chl = 0.073 TP^{1.45}, \quad (2)$$

где обозначения те же, что и для уравнения (1).

На рис. 1а видно, что по мере увеличения содержания фосфора в воде изученных незагрязненных озер концентрация Хл *a* нарастает более медленно по сравнению с расчетными значениями по уравнению Диллона–Риглера. В то же время, следует подчеркнуть, что полученная зависимость справедлива только для изученного диапазона концентраций общего фосфора (3–30 мкг/л). В водоемах Карелии, не затронутых антропогенной деятельностью, верхний предел концентрации общего фосфора достигает ~80 мкг/л (Озера ..., 2013).

Более низкие прогнозируемые концентрации Хл *a* в полученной зависимости объясняются тем, что в озерах с повышенной цветностью воды фосфор связан с железом в составе гумусового ОВ. На фосфаты, доступные для быстрой биохимической трансформации и потребления фитопланктоном, обычно приходится лишь ~10% общего фосфора в незагрязненных озерах Карелии (Заличева, Волков, 1994).

Для подтверждения этого предположения была изучена связь между цветностью воды как косвенным показателем наличия гумусового вещества и концентрацией общего фосфора. Зависимость изучали по данным параллельных измерений в тех же водоемах, что и при выявлении связи “общий фосфор–хлорофилл *a*”. Цветность воды в незагрязненных водоемах находилась в пределах олиго- и мезогумозных вод (Lozovik, 2013) (табл. 1).

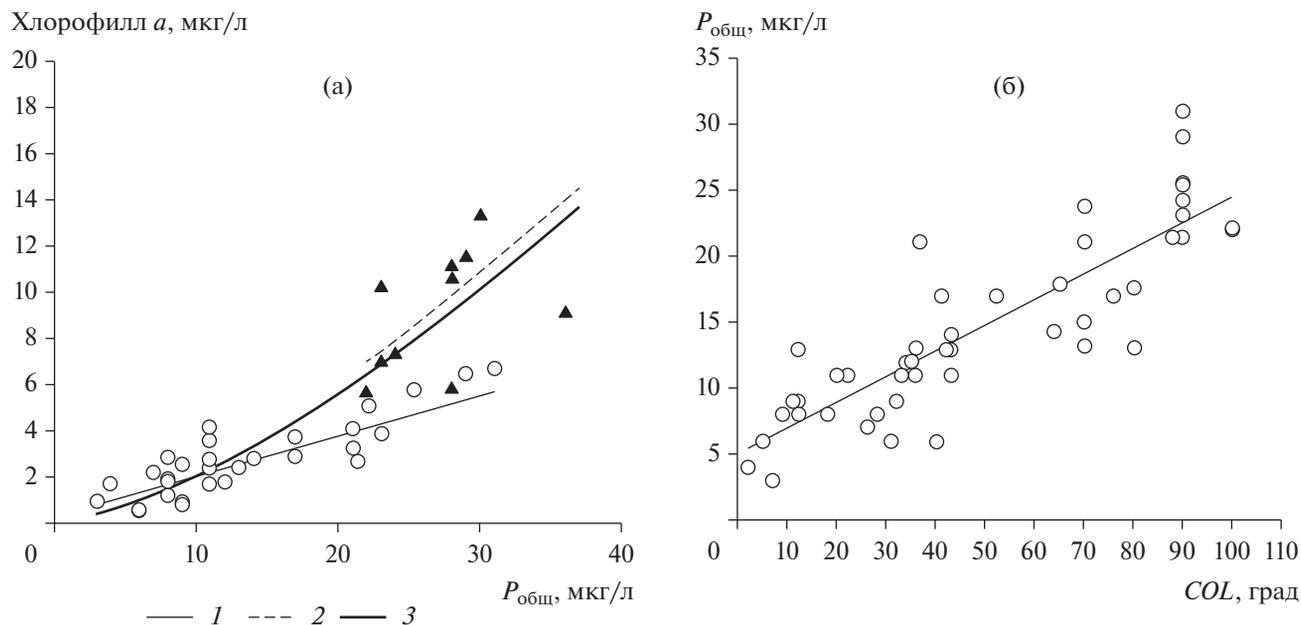


Рис. 1. Связь между концентрацией Хл *a*, содержанием общего фосфора и цветностью воды в озерах Карелии: а – зависимость концентрации хлорофилла *a* от общего фосфора; б – зависимость содержания общего фосфора от цветности воды. ○ – Эмпирические данные для незагрязненных вод, ▲ – эмпирические данные для вод под влиянием форелевых хозяйств. 1 – линия тренда для эмпирических данных в незагрязненных водах, 2 – линия тренда для эмпирических данных при влиянии форелевых хозяйств, 3 – расчетная зависимость по уравнению Диллона–Риглера.

По результатам анализа, достоверная зависимость концентрации общего фосфора от показателя цветности воды (коэффициент ранговой корреляции Спирмена 0.85, $n = 46$, $p < 0.05$) (рис. 1б), описана уравнением (3). Такая тесная связь подтверждает, что большая часть фосфора поступает в водоемы в составе гумусового вещества.

$$COL = (0.19 \pm 0.02) TP + (5.06 \pm 1.0), \quad (3)$$

где *COL* – цветность воды (град), *TP* – концентрация общего фосфора (мкг/л).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Следует отметить, что даже при высоких показателях цветности воды (100 град) и, соответственно, повышенном содержании гумусовых веществ, концентрации общего фосфора в незагрязненных водах невысоки и не превышают пределов для мезотрофных вод. Это может указывать на невысокий эвтрофирующий эффект для водоема даже при большом стоке высокоцветных речных вод.

Еще одной причиной, по которой замедляется нарастание концентраций Хл *a* по мере увеличения содержания общего фосфора в незагрязненных водах, может быть ухудшение оптических свойств воды. В карельских водоемах прозрачность воды является, главным образом, функцией ее цветности в условиях слабого развития планктона (Озера..., 2013). Кроме цветности во-

ды, содержание в воде гумусовых веществ отражает растворенный органический углерод. Например, его средняя концентрация в Петрозаводской губе Онежского озера достигает летом 8.7 мг/л при цветности воды ~37 град. В литературе приводятся пороговые значения растворенного органического углерода 11 мг/л (Senar et al., 2019, 15 мг/л (Robidoux et al., 2015), выше которых даже стимуляция биогенными веществами не вызывает повышения первичной продукции. В таких условиях недостаток света выступает главным фактором в лимитировании фитопланктона.

Оставалось неизвестным, подчиняется ли соотношение концентрации общего фосфора и Хл *a* в водоемах Карелии, испытывающих антропогенную нагрузку фосфором, выявленной зависимости для незагрязненных вод. Ранее показано, что в таких водоемах доля минерального фосфора в его общем содержании в воде увеличивается приблизительно до 70% (Лозовик, 2017). В качестве объекта был выбран участок Кондопожской губы Онежского озера, где расположено множество форелевых садков. В этом случае концентрации Хл *a* и фосфора тесно связаны (коэффициент ранговой корреляции Спирмена 0.74, $n = 12$, $p < 0.05$) (рис. 1а). Однако эта связь полностью соответствует генеральной зависимости Диллона–Риглера уравнение (2) и описывается уравнением (4):

$$Chl = (0.10 \pm 0.15) TP^{(1.38 \pm 0.43)}, \quad (4)$$

где обозначения те же, что и в уравнении (1).

Выводы. Таким образом, геохимические особенности Карельского региона определяют отличную от генеральной зависимости Диллона–Риглера связь концентрации Хл *a* с содержанием общего фосфора в водоемах. Это проявляется в замедлении нарастания концентрации Хл *a* по мере увеличения в воде общего фосфора из-за недоступности большей его части, связанной с железом в гумусовом веществе, и ухудшения оптических свойств воды. В водных объектах Карелии, находящихся под влиянием фосфорной антропогенной нагрузки, зависимость концентрации Хл *a* от содержания общего фосфора подчиняется общепринятому уравнению Диллона–Риглера. Оценка трофического статуса высокоцветных вод по концентрации общего фосфора может быть завышена из-за малой доли минерального фосфора в общем содержании этого элемента в воде. Такое несоответствие может привести к неоправданно большой допустимой антропогенной нагрузке минеральным фосфором. Согласно современным нормативам качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения в России, допустимую нагрузку минеральным фосфором на водоем рассчитывают, исходя из трофического статуса водоема на основе концентрации общего фосфора в воде. Возрастание стока в водоемы Карелии гумусовых веществ при современном потеплении климата повышает неопределенность в оценке их трофического статуса по концентрации общего фосфора. Полученные результаты вполне могут быть применимы и для озер с повышенной цветностью воды в других регионах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Заличева И.Н., Волков И.В.* 1994. К вопросу о регламентировании антропогенной нагрузки биогенными веществами на водные экосистемы в таежной природно-климатической зоне // *Вод. ресурсы*. Т. 21. № 6. С. 674.
- Зобкова М.В., Ефремова Т.А., Лозовик П.А., Сабылина А.В.* 2015. Органическое вещество и его компоненты в поверхностных водах гумидной зоны // *Успехи совр. естествознания*. № 12. С. 115.
- Лозовик П.А.* 2017. Антропогенные нагрузки на Онежское озеро от различных источников формирования химического состава воды // *Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения*: Сб. науч. тр. Всерос. науч. конф. Новочеркасск: Лик.
- Сабылина А.В., Икко О.И.* 2019. Изменение химического состава воды озера Мунозеро (Карелия) за последние 60 лет // *Тр. Карельск. науч. центра РАН*. № 9. С. 76.
<https://doi.org/10.17076/lim1046>
- Сабылина А.В., Ефремова Т.А., Икко О.И.* 2020. Химический состав гидрокриогенной системы озер Мунозеро и Урозера (Республика Карелия, Россия) // *Лед и Снег*. Т. 60. № 4. С. 592.
<https://doi.org/10.31857/S2076673420040063>
- Озера Карелии.* Справочник. 2013. Петрозаводск: Карельск. науч. центр РАН.
- Теканова Е.В., Лозовик П.А., Калинкина Н.М. и др.* 2011. Современное состояние и трансформация северной части Выгозерского водохранилища // *Тр. Карельск. науч. центра РАН*. № 4. С. 50.
- Трифонов И.С.* 1993. Оценка трофического статуса водоемов по содержанию хлорофилла *a* в планктоне // *Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов*. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат. С. 158.
- Carlson R.E., Havens K.E.* 2005. Simple graphical methods for the interpretation of relationships between trophic state variables // *Lake Reservoir Management*. V. 21. Iss. 1. P. 107.
<https://doi.org/10.1080/07438140509354418>
- Dillon P.J., Rigler F.H.* 1974. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes // *Limnology and oceanography*. V. 19. Iss. 5. P. 767.
- Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A. et al.* 2020. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? // *J. Great Lakes Res.* V. 46. Iss. 4. P. 850.
<https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.02>
- Lozovik P.A.* 2013. Geochemical classification of surface waters in humid zone based on their acid-base equilibrium // *Water Resour.* V. 40. № 6. P. 631.
<https://doi.org/10.1134/S0097807813060067>
- Robidoux M., Giorgio P., Derry A.* 2015. Effects of humic stress on the zooplankton from clear and DOC rich lakes // *Freshw. Biol.* V. 60. Iss. 7. P. 1263.
<https://doi.org/10.1111/fwb.12560>
- SCOR-UNESCO Working Group № 17. 1966. Determination of photosynthetic pigments in sea water // *Monographs on Oceanographic Methodology*, 1. Paris: UNESCO.
- Senar O.E., Creed I.F., Strandberg U., Arts M.T.* 2019. Brown-ing reduces the availability – but not the transfer – of essential fatty acids in temperate lakes // *Freshw. Biol.* V. 64. Iss. 12. P. 2107.
<https://doi.org/10.1111/fwb.13399>

The Dependence of Chlorophyll *a* Concentration on Total Phosphorus in Water Bodies with Water Color Increasing

N. M. Kalinkina¹, * and E. V. Tekanova¹

¹*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia*

**e-mail: cerioda@mail.ru*

Compared to the generally equation by Dillon–Riegler an increase in total phosphorus in the water of Karelian lakes leads to a slower growth in chlorophyll *a* due to the high water color. The reason for this delay is the specific form as a iron-bound phosphorus with humic substance. This is indirectly confirmed by the significant dependence of total phosphorus on the water color. The equation has been proposed for calculating of chlorophyll *a* concentration using the total phosphorus value for water bodies of Karelia not affected by anthropogenic influence for the first time. It is discussed that the overestimation of the real trophic state of water bodies in Karelia based on the total phosphorus value can lead to an unreasonably high permissible anthropogenic phosphorus load on water bodies in Karelia.

Keywords: lakes of Karelia, water body productivity, chlorophyll *a*, total phosphorus, water color