



УДК УДК 574.55:556.5(470.22)

АНАЛИЗ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ВОДОЕМОВ В РАЗНЫХ ЛАНДШАФТАХ КАРЕЛИИ

| | |
|---------------------------------------|---|
| ТЕКАНОВА Елена Валентиновна | <i>Институт водных проблем Севера Карельский научный центр РАН, etekanova@mail.ru</i> |
| КРАВЧЕНКО Ирина Юрьевна | <i>Институт водных проблем Севера Карельский научный центр РАН, irina.potapova@inbox.ru</i> |
| ПОТАХИН Максим Сергеевич | <i>Институт водных проблем Севера Карельский научный центр РАН, mprotakhin@mail.ru</i> |
| БОГДАНОВА Мария Сергеевна | <i>Институт водных проблем Севера Карельский научный центр РАН, mari-mb@mail.ru</i> |

Ключевые слова:
озера Карелии
ландшафт
биопродуктивность
водообмен
водосбор
цветность воды

Аннотация: Изучены природные абиотические факторы формирования биопродуктивности семи маловодообменных и малоприточных озер в разных ландшафтах Карелии. Водоемы характеризуются невысоким уровнем трофии (олиго- и мезотрофные). Статистический анализ показал, что при отсутствии антропогенного воздействия обеспеченность фосфором и уровень трофии изученных озер определяются условным водообменом, притоком на единицу толщи воды, цветностью воды и ландшафтными особенностями. Наиболее продуктивные из изученных водоемов расположены на флювиогляциальных и моренных равнинах. Они выделяются большим привнесением фосфора в состав гумусовых веществ на единицу толщи воды с водосборной территории, где преобладают подзолистые почвы.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: С. В. Баканев

Получена: 23 сентября 2016 года

Подписана к печати: 29 июня 2017 года

Введение

Озеро формируется и эволюционирует в условиях комплексного воздействия окружающей его территории, поэтому представляет собой единую систему с водосборной площадью. На морфологические, гидрологические, гидрофизические, гидрохимические особенности водоема влияют как зональные (температура, суммарная солнечная радиация, годовое количество осадков

и испарение, модуль годового стока), так и азональные (подстилающие горные породы, рельеф, тип и химия почв, соотношение подземного и поверхностного питания водоема, проточность) факторы (Драбкова, Сорокин, 1979). Влияние ландшафтных особенностей на биологический режим водоема носит опосредованный характер. Структурные и функциональные характеристики биоты отражают сложившиеся в данной климатической зоне и ландшафте особенности водо-

ема. Уровень биопродуктивности водоемов одной климатической зоны будет зависеть в первую очередь от возможности насыщения озерной воды фосфором – главным биогенным элементом, лимитирующим развитие автотрофной компоненты экосистемы.

Настоящая работа направлена на выявление природных закономерностей формирования первичной продукции малых водоемов Карелии в разных ландшафтных зонах. Сведения о ландшафтных особенностях, гидрологии, морфологии и химии воды пяти озер (Коверъярви, Ле-

ликозеро, Мягрозеро, Гижозеро, Кондозеро) представлены в этой работе впервые.

Материалы

Работа выполнена на семи водоемах, расположенных в трех ландшафтных районах среднетаежной зоны южной части Карелии (ледораздельная возвышенность, моренный и сельговый). Все водоемы относятся к категории маловодообменных и слабо приточных и практически не затронуты антропогенной деятельностью (рис. 1).

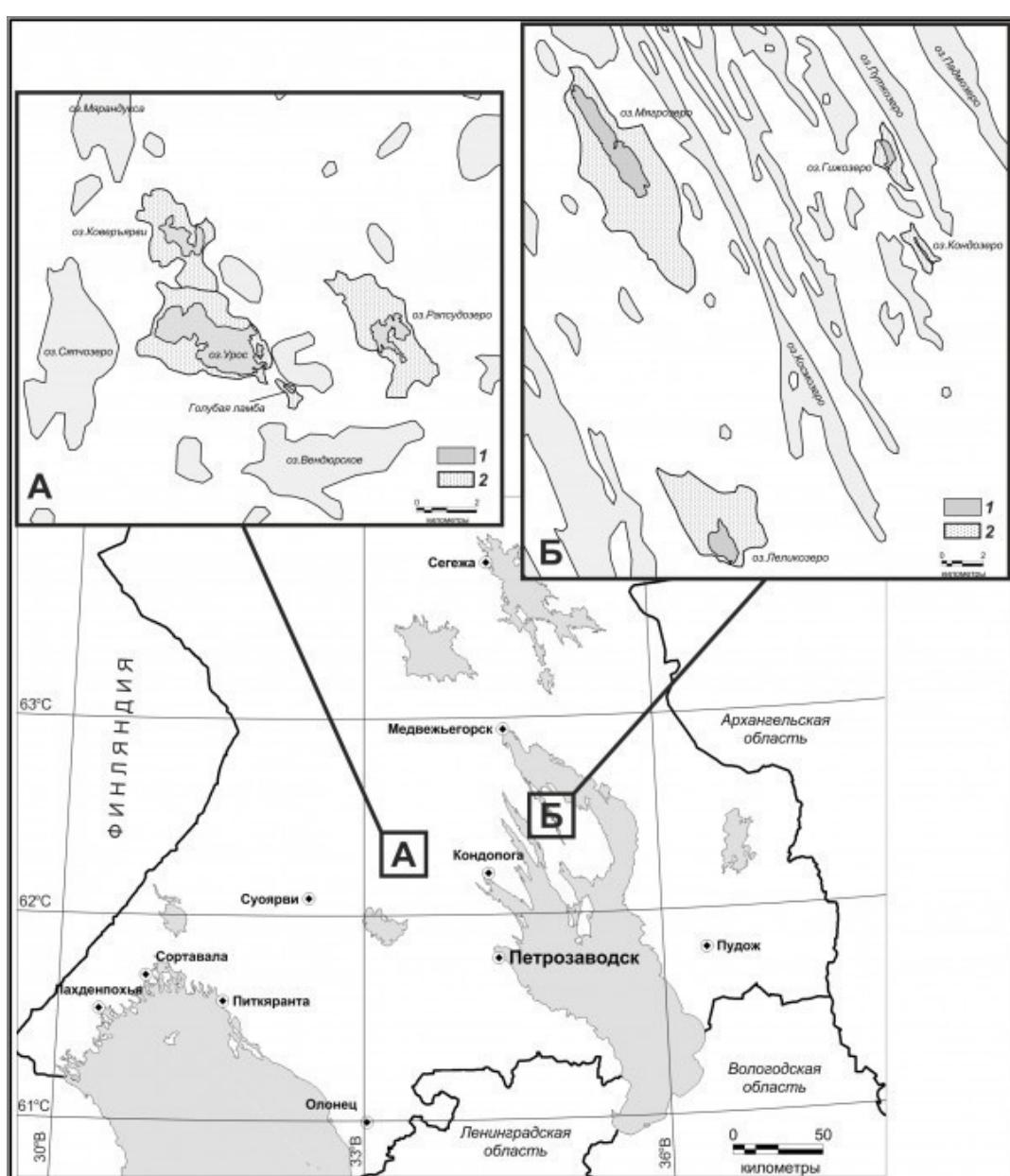


Рис. 1. Карта-схема расположения озер: А – Вохтозерская ледораздельная возвышенность; Б – Заонежский полуостров; 1 – озеро; 2 – водосборная территория

Fig. 1. Scheme of the location of studied lakes: A – Vohtozerskaya iceshed height; B – Zaonezhsky peninsula; 1 – Lake; 2 – Water-collecting area

Озера Урос, Рапсудозеро и Коверъярви расположены на Вохтозерской ледораздельной возвышенности с сильно перемытыми четвертичными отложениями и бедными гумусом кислыми иллювиально-железистыми подзолистыми почвами. На водосборе оз. Урос преобладают геокомплексы флювиогляциальных гряд и равнин, а также торфяники, Рапсудозеро и Коверъярви лежат на флювиогляциальных и моренных равнинах и торфяниках. Озера Леликозеро и Мягрозеро находятся в моренном, Гижозеро и Кондозеро — сельговом ландшафтах Заонежья с более богатыми гумусом буроземами и дерновыми почвами (см. рис. 1).

В работе были использованы следующие

характеристики водоемов: средневегетационная скорость фотосинтеза фитопланктона, средняя глубина, насыщение воды кислородом, минерализация, цветность, БПК₅, pH и перманганатная окисляемость воды, заболоченность водосборной территории, удельный водосбор, удельный водосбор по Шиндлеру, условный водообмен, преобладающий тип почв (табл. 1). Пробы воды для определения химических показателей на озерах Урос ($n = 9$), Рапсудозеро ($n = 8$), Коверъярви ($n = 7$), Леликозеро ($n = 6$), Мягрозеро ($n = 6$), Гижозеро ($n = 5$), Кондозеро ($n = 3$) были взяты в центральной части водоемов в зимний, весенний и летний периоды 2011 и 2012 гг.

Таблица 1. Характеристика водосборной территории, гидрологические и гидрохимические показатели изученных озер

| Показатель | Урос | Рапсудозеро | Коверъярви | Леликозеро | Мягрозеро | Гижозеро | Кондозеро |
|---|---------|-------------|------------|------------|-----------|----------|-----------|
| Глубина | | | | | | | |
| средняя, м | 2.3 | 3.4 | 2.5 | 5.7 | 5.6 | 5.2 | 7.6 |
| Тип почв | | | | | | | |
| подзолы | подзолы | подзолы | буровоземы | буровоземы | подбуры | подбуры | |
| Заболоченность, % | 49 | 33 | 32 | 11 | 14 | 9 | 7 |
| Удельный водосбор | 2.1 | 6.9 | 5.6 | 4.8 | 3.8 | 3.8 | 6.4 |
| Условный водообмен, год ⁻¹ | 0.41 | 0.85 | 0.89 | 0.36 | 0.36 | 0.39 | 0.39 |
| Удельный водосбор по Шиндлеру | 0.43 | 2.32 | 2.23 | 0.84 | 0.83 | 0.93 | 0.99 |
| Минерализация, мг/л | | | | | | | |
| Сред. | 10.7 | 12.7 | 14 | 16.3 | 108.7 | 32.1 | 13.7 |
| Min | 5.5 | 10.6 | 11.1 | 13.6 | 104.6 | 31.3 | 13.6 |
| Max | 12.8 | 14.1 | 22.7 | 19.9 | 133.2 | 33.6 | 13.8 |
| pH | | | | | | | |
| Сред. | 6.3 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 7.8 | 7.3 | 6.3 |
| Min | 5.9 | 6.1 | 6.4 | 6.3 | 7.4 | 6.7 | 6 |
| Max | 6.6 | 6.9 | 6.9 | 7 | 8.2 | 7.4 | 6.5 |
| Насыщение воды кислородом, % | | | | | | | |
| Сред. | 91 | 85 | 84 | 83 | 67 | 84 | 73 |
| Min | 60 | 10 | 78 | 20 | 33 | 46 | 52 |
| Max | 96 | 94 | 90 | 96 | 108 | 98 | 94 |
| Цветность, град. | | | | | | | |
| Сред. | 10 | 22 | 92 | 10 | 10 | 13 | 26 |
| Min | 3 | 15 | 65 | 7 | 5 | 13 | 26 |
| Max | 15 | 35 | 118 | 12 | 10 | 14 | 27 |
| БПК₅, мг О₂/л | | | | | | | |
| Сред. | 0.45 | 0.75 | 1.1 | 0.73 | 1.16 | 0.93 | 1.08 |
| Min | 0.23 | 0.43 | 0.66 | 0.5 | 0.72 | 0.65 | 1.04 |
| Max | 1.59 | 2.56 | 2.33 | 1.78 | 1.58 | 1.22 | 1.12 |
| Перманганатная окисляемость воды, мг О₂/л | | | | | | | |
| Сред. | 4.05 | 5.9 | 12.9 | 4.53 | 5.03 | 5.86 | 7.4 |
| Min | 3.67 | 5.08 | 10.5 | 4.02 | 3.57 | 4.04 | 7.14 |
| Max | 6.57 | 7.34 | 15.1 | 4.98 | 5.86 | 8.7 | 7.66 |
| P_{общ}, мкг/л | | | | | | | |
| Сред. | 7 | 20.8 | 17.2 | 7.1 | 10 | 8.9 | 11 |
| Min | 4.3 | 9.8 | 12.5 | 4.5 | 7.2 | 6.8 | 9 |
| Max | 11.9 | 29.1 | 21.2 | 11.9 | 23.8 | 11 | 13 |

Методы

Трофический статус озер оценивался по продукции фитопланктона (Винберг, 1960; Бульон, 1983). Средневегетационная скорость фотосинтеза фитопланктона рассчитывалась по концентрации фосфора в воде озер (см. табл. 1) с использованием уравнений 1 и 2 масс-балансовой модели потока вещества и энергии в водной экосистеме (Hakanson, Boulion, 2001; Бульон, 2005).

$$P_{\text{php}} = 30 \cdot Chl, \quad [1]$$

$$Chl = 0.073 \cdot TP^{1.451}, \quad [2]$$

где P_{php} – фотосинтез фитопланктона, мкг С/л·сут, Chl – концентрация хлорофилла «а», мкг/л, P – концентрация общего фосфора, мкг/л.

Кластерный и компонентный анализы выполнены в лицензированном пакете Statistica Advanced 10 for Windows Ru.

Результаты

За критерий биопродуктивности принятая продукция фитопланктона (фотосинтез) – основа трофической сети и начальный этап потока вещества и энергии в водной экосистеме, широко используемая в трофических классификациях водоемов. По величине фотосинтеза озера Урос, Леликозеро, Гижозеро, Кондозеро и Мягрозеро относятся к олиготрофному, Коверъярви – к олигогемотрофному, Рапсудозеро – к мезотрофному типу водных экосистем (табл. 2).

Таблица 2. Средневегетационная скорость фотосинтеза

| Показатель | Урос | Рапсудозеро | Коверъярви | Леликозеро | Мягрозеро | Гижозеро | Кондозеро |
|------------------------|--------------|-------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Фотосинтез, мг С/л·сут | 36.9 | 179 | 135.9 | 37.6 | 61.9 | 49.7 | 71 |
| Трофический тип | олиготрофный | мезотрофный | олигомезотрофный | олиготрофный | олиготрофный | олиготрофный | олиготрофный |

По результатам кластерного анализа выделяются три группы озер (рис. 2). В первый кластер при минимальной дистанции сцепления входят Леликозеро и Гижозеро – схожие по глубине, с малыми величинами водообмена, удельного водосбора, заболоченности водосбора, фотосинтеза, цветности и с хорошим насыщением воды кислородом. К этой группе с большей дистанцией сцепле-

ния примыкает оз. Кондозеро. Их сходство ограничивается величинами условного водообмена, удельного водосбора по Шиндлеру, степенью заболоченности, в меньшей степени – величиной фотосинтеза. Затем к этой группе присоединяется оз. Урос по признакам общего сходства показателей условного водообмена и фотосинтеза (см. табл. 1, 2).

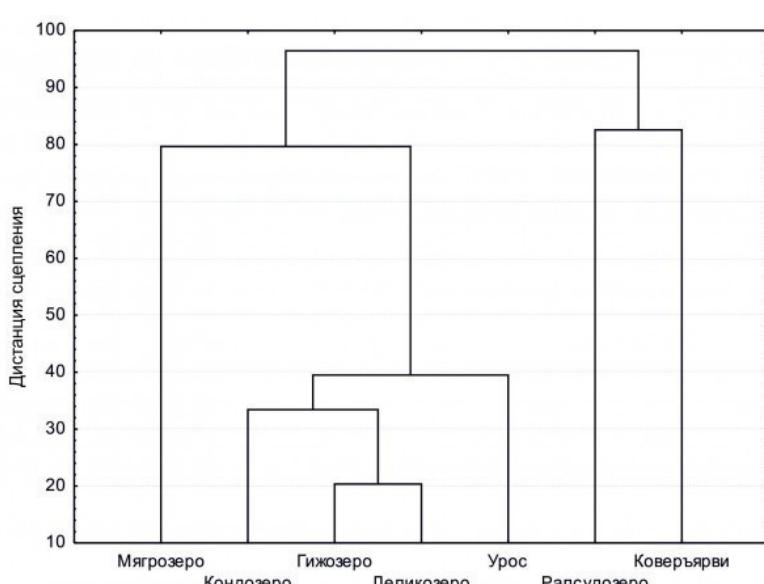


Рис. 2. Дендрограмма классификации изученных озер методом ближайшего соседа. Одиночное сцепление

Fig. 2. Dendrogram of classification of studied lakes by the nearest-neighbour method. Single linkage

Вторую группу составляют Рапсудозеро и Коверъярви, которые отличаются от остальных водоемов самыми большими величинами водообмена, удельного водосбора по Шиндлеру, заболоченности водосбора, типом почв и более высоким фотосинтезом (см. табл. 1, 2).

Отдельную группу представляет оз. Мягрозеро, главным образом за счет очень больших отличий от остальных водоемов в минерализации воды, реакции среды и насыщении воды кислородом по причине большой доли подземного питания в водном балансе. Как известно, грунтовые воды более минерализованные, щелочные и содержат меньше кислорода, чем поверхностные. При этом по многим другим показателям (степень заболоченности водосбора, удельный водосбор, условный водообмен, цветность воды, фотосинтез) водоем связан с первой группой (см. табл. 1, 2).

Для выявления сопряженности фотосинтеза и внешних факторов среды был выполнен компонентный анализ. Учитывая небольшой объем выборки, для под-

тверждения достоверности факторных нагрузок анализ был проведен не только для всех семи водоемов, но и после поочередного исключения из выборки того или иного водоема (8 вариантов анализа). Действительно достоверными считались факторные нагрузки более 0.7 по абсолютному значению во всех вариантах анализа.

По результатам компонентного анализа первые две компоненты (фактор 1 и фактор 2) отразили существенную долю общей изменчивости признаков – 74 % (табл. 3). В первую главную компоненту с действительно достоверной положительной факторной нагрузкой, подтвержденной во всех вариантах анализа, вошли следующие показатели: средневегетационная скорость фотосинтеза, цветность воды, условный водообмен, удельный водосбор по Шиндлеру. Факторная нагрузка показателя «тип почвы» оказалась достоверной в 7 из 8 вариантов компонентного анализа, а показателя «средняя глубина» – в 6 вариантах.

Таблица 3. Результаты компонентного анализа (факторные нагрузки признаков) семи изученных озер

| Переменная | Фактор 1 | Фактор 2 | Фактор 3 |
|---|----------|----------|----------|
| Заболоченность, % | -0.661 | 0.616 | -0.321 |
| Удельный водосбор | -0.43 | -0.664 | 0.449 |
| Условный водообмен | -0.944 | -0.267 | -0.126 |
| Удельный водосбор по Шиндлеру | -0.825 | -0.486 | -0.046 |
| Минерализация, мг/л | 0.57 | -0.343 | -0.735 |
| pH | 0.483 | -0.372 | -0.705 |
| Насыщение О ₂ , % | -0.56 | 0.71 | 0.192 |
| Цветность, град. | -0.73 | -0.441 | -0.024 |
| Фотосинтез, мкг С/л·сут | -0.797 | -0.415 | -0.097 |
| Тип почвы | 0.752 | -0.367 | 0.429 |
| БПК ₅ , мг О ₂ /л | 0.16 | -0.944 | -0.15 |
| Перманганатная окисляемость, мг О ₂ /л | -0.63 | -0.583 | 0.052 |
| Глубина средняя, м | 0.737 | -0.477 | 0.447 |
| Доля в общей дисперсии, % | 44.3 | 29.6 | 14 |

Во вторую главную компоненту при анализе 7 озер с достоверными факторными нагрузками вошли показатели «насыщение воды кислородом» и «БПК₅» (легкоминерализуемое органическое вещество), однако в ходе проверки с поочередным изъятием из выборки одного из водоемов достоверность этой связи была подтверждена лишь в 5 из 8 случаев.

В третью компоненту (фактор 3), отражающую 14 % общей изменчивости при-

знаков, с достоверной факторной нагрузкой во всех вариантах анализа вошли показатели «минерализация» и «pH воды».

Обсуждение

Так как средневегетационная скорость фотосинтеза была рассчитана по содержанию в воде общего фосфора, очевидно, что выполненный анализ выявлял факторы, влияющие на обеспеченность изученных водоемов фосфором – главным биогенным элементом,

определяющим уровень первичной продукции и, соответственно, биопродуктивность большинства пресноводных экосистем.

Более продуктивные водоемы Рапсудозеро (мезотрофный) и Коверъярви (олигомезотрофный) расположены в пределах Вохтозерской ледораздельной возвышенности на флювиогляциальных и моренных равнинах в сочетании с торфяниками и преимущественно подзолистыми почвами с хорошим промывным режимом и растворимыми гумусовыми веществами. Эти озера характеризуются наибольшими величинами условного водообмена, удельного водосбора, цветности воды.

Малопродуктивные (олиготрофные) озера обнаружены в Заонежье на сельговых грядах с маломощным слоем элювиальных, делювиальных и моренных отложений и выходами коренных пород с преобладанием подбров (Гижозеро и Кондозеро), а также на моренных равнинах, сложенных песчано-валунными отложениями и торфяниками с преимущественно буроземными почвами (Леликозеро, Мягрозеро). В отличие от первой группы, эти водоемы обладают низкой цветностью воды, очень слабой приточностью и проточностью, а почвы характеризуются наличием грубого гумуса.

Кроме того, на Вохтозерской ледораздельной возвышенности в том же геокомплексе, что и самые продуктивные Рапсудозеро и Коверъярви, находится олиготрофное оз. Урос. С другими олиготрофными водоемами его объединяют низкие показатели цветности, условного водообмена и удельного водосбора.

Как было показано П. А. Лозовиком (2006, 2013), в поверхностных водах гумидной зоны фосфор в водоемах находится, главным образом, в составе комплексов с железом и почвенным гумусом, поэтому его концентрация тесно связана с величиной цветности воды. Поступление фосфора в водоем определяется выносом этих комплексов с водосборной территории с русловым и склоновым стоками, то есть величиной приточности (условный водообмен, удельный водосбор). Увеличение приточности водоема закономерно ведет к возрастанию концен-

трации фосфора в воде. Однако при достижении определенной степени проточности концентрация фосфора в водоеме определяется уже не поступлением их с водосбора, а выносом из озера, и уровень трофии таких озер снижается (Драбкова, Сорокин, 1979; Сорокин, 1983; Китаев, 1984; Лозовик, 2006 и др.). Среди изученных маловодообменных озер связь уровня трофии и удельных показателей приточности и проточности положительная и определяется привнесением фосфора в водоемы (см. табл. 3). Примечательно, что достоверной оказалась связь трофии не с широко известным в гидрологии показателем удельного водосбора, который характеризует приток на единицу поверхности водоема, а с показателем удельного водосбора, предложенным Шиндлером (Schindler, 1971), в котором оценивается приток на единицу толщи воды. Это вполне объяснимо, так как поступающий в водоем фосфор также распределяется в толще воды.

Заключение

В целом изученные озера характеризуются невысоким уровнем трофии. При отсутствии антропогенного воздействия обеспеченность этих водоемов фосфором и формирование их биопродуктивности определяются комплексом азональных абиотических факторов. Скорость фотосинтеза (и концентрация фосфора в воде) в озерах положительно связана с условным водообменом, удельным водосбором по Шиндлеру, цветностью воды и зависит от ландшафтных особенностей. Наиболее продуктивные озера Рапсудозеро (мезотрофный) и Коверъярви (олиготрофный) расположены на флювиогляциальных и моренных равнинах. Они выделяются большим привнесением фосфора в составе гумусовых веществ на единицу толщи воды с водосборной территории, где преобладают подзолистые почвы. Олиготрофные озера Леликозеро, Гижозеро, Кондозеро, Мягрозеро находятся в моренном и сельговом ландшафтах с преобладанием подбров и буроземов. Эти озера характеризуются меньшей приточностью и приточностью, а соответственно, низкими величинами цветности воды и поступления фосфора.

Библиография

- Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов . Л.: Наука, 1983. 150 с.
Бульон В. В. Моделирование потоков энергии в озерных экосистемах как инструмент гидробиологических исследований // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 3. С. 361–370.
Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов . Минск: АН БССР, 1960. 328 с.
Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор – единая природная система . Л.: Наука, 1979. 195 с.

- Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон . М.: Наука, 1984. 207 с.
- Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 583–592.
- Лозовик П. А. Гидрогоеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивость к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... д-ра хим. наук . М., 2006. 58 с.
- Сорокин И. Н. Морфометрия озер и их внешний водообмен. Поступление и удержание веществ в озерах // Изменения в системе «водосбор-озеро» под влиянием антропогенного фактора. Л.: Наука, 1983. С. 69–78.
- Hakanson L., Boulion V. V. A practical approach to predict the duration of the growing season for European lakes // Ecol. model. 2001. Vol. 140. № 3. P. 235–345.
- Schindler D. W. A Hypothesis to explain differences and similarities among lakes in the experimental lakes area, northwestern Ontario // J. Fish. Res. Board Canada. 1971. Vol. 28. № 2. P. 295–

ANALYSIS OF THE NATURAL FACTORS OF BIOLOGICAL PRODUCTIVITY OF WATER BODIES IN THE DIFFERENT LANDSCAPES OF KARELIA

| | |
|---------------------------------------|--|
| TEKANOVA Elena Valentinovna | <i>Northern Water Problems Institute Karelian Research Center RAS,</i> <i>etekanova@mail.ru</i> |
| KRAVCHENKO Irina Yuryevna | <i>Northern Water Problems Institute Karelian Research Center RAS,</i> <i>irina.potapova@inbox.ru</i> |
| POTAKHIN Maxim Sergeevich | <i>Northern Water Problems Institute Karelian Research Center RAS,</i> <i>mpotakhin@mail.ru</i> |
| BOGDANOVA Maria Sergeevna | <i>Northern Water Problems Institute Karelian Research Center RAS,</i> <i>mari-mb@mail.ru</i> |

Key words:
lakes of Karelia
landscape
biological productivity
water exchange
water-collecting area
water color

Summary: Abiotic environmental factors of biological productivity were studied in seven lakes with low water exchange and a few inflows in different landscapes of Karelia (Russia). Lakes are not exposed to human impact. An indicator of the biological productivity is the phytoplankton photosynthesis rate calculated on the concentration of phosphorus in water. The water bodies vary from oligotrophic to mesotrophic according to their trophic level. Cluster and component analysis of chemicals was carried out, hydrological, morphometric and landscape characteristics of the lakes were also determined. It was shown that in the absence of anthropogenic influence the availability of phosphorus and trophic level of the studied lakes in the humid zone are determined by the water exchange, effluent per unit of water column, color of water and landscape features. The most productive water bodies are located on the fluvioglacial and moraine plains dominated by podzolic soils, which have a good flushing regime and soluble humus substances. These lakes are distinguished by a larger inflow of phosphorus forming a part of humus substances originated from the water-collecting area per unit of water column. Oligotrophic lakes are located in moraine and selga landscapes dominated by podzols and brown soils with a lot of humus slightly transformed. These lakes are characterized by less water exchange and drainage factor, and, accordingly, low values of phosphorus input and water color.

Reviewer: S. V. Bakanev

Received on: 23 September 2016

Published on: 29 June 2017

References

- Bul'on V. V. Modeling energy fluxes in lake ecosystems as a means of hydrobiological studies, Vodnye resursy. 2005. T. 32. No. 3. P. 361–370.
- Bul'on V. V. Primary production of plankton in inland waters. L.: Nauka, 1983. 150 p.
- Drabkova V. G. Sorokin I. N. The lake and its watershed is a unified natural system. L.: Nauka, 1979. 195 p.
- Hakanson L., Bouliou V. V. A practical approach to predict the duration of the growing season for European lakes, Ecol. model. 2001. Vol. 140. No. 3. P. 235–345.
- Kitaev S. P. Ecological basis of bioproductivity of the lakes in different natural areas. M.: Nauka, 1984. 207 p.
- Lozovik P. A. Geochemical classification of surface water in humid zone on the basis of their acid-base bal-

- ance, Vodnye resursy. 2013. T. 40. No. 6. P. 583–592.
- Lozovik P. A. Hydrogeochemical criteria of surface water in humid zone and their resistance to human impact. M., 2006. 58 p.
- Schindler D. W. A Hypothesis to explain differences and similarities among lakes in the experimental lakes area, northwestern Ontario, J. Fish. Res. Board Canada. 1971. Vol. 28. No. 2. P. 295–310.
- Sorokin I. N. Morphometry of lakes and their external water exchange. Receipt and retention of substances in lakes, Izmeneniya v sisteme «vodosbor-ozero» pod vliyaniem antropogenного faktora. L.: Nauka, 1983. P. 69–78.
- Vinberg G. G. Primary production of water bodies. Minsk: AN BSSR, 1960. 328 p.