

ДИАГНОСТИКА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМ*

В.В. Бульон

E-mail: vboulion@mail.ru

*ФГБУН «Зоологический институт Российской академии наук»,
Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ: Представлена система оценки биологической продуктивности озерных экосистем. Входные параметры (x -переменные) – географическая широта, удельный водосбор, среднегодовая температура воздуха, годовая сумма осадков, средняя и максимальная глубина водоема, время пребывания воды в нем, средние за вегетационный сезон значения цветности воды и суточного ассимиляционного числа хлорофилла a фитопланктона. В условиях дефицита данных по экологическому состоянию водоемов система диагностики часто совмещается с моделированием, позволяющим реконструировать наиболее важные биолого-продукционные характеристики водных объектов. Значимость моделей для диагностики заключается в том, что с их помощью, используя соответствующие базы данных, можно извлечь и концентрировать необходимую информацию и представить ее в количественном виде. Одна из таких баз данных создана для озер и водохранилищ, расположенных на территории бывшего СССР и сопредельных регионов. Основной массив данных собран в 1960–1980-х годах в рамках Международной биологической программы, программы ЮНЕСКО «Человек и биосфера» и ряда государственных и международных проектов. Обобщение и анализ данных позволили выявить ряд закономерных связей между биотическими и абиотическими компонентами водных экосистем.

Цель исследования – разработка системы диагностики индикаторных биологических параметров – продукции ключевых групп гидробионтов (продуцентов, редуцентов и консументов разного порядка, включая рыб). В качестве аргументов используются абиотические факторы, определяющие жизнедеятельность организмов и функционирование водных экосистем в целом. Объекты исследования – озера Российской Федерации и Республики Беларусь, относящиеся к гумидной зоне Европейского континента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диагностика водоемов, продукция наземной фитомассы, продукция гидробионтов, рыбопродуктивность, факторы внешней среды, эвтрофирование, водная экосистема.

© Бульон В.В., 2019

* Работа выполнена при поддержке гос. задания № АААА-А17-117021310121-0 «Исследования динамики трофических связей, биологического разнообразия и закономерностей круговорота биогенных элементов в экосистемах континентальных водоемов, вызванной антропогенным воздействием и колебаниями климата»

В связи с недостатком информации об экологическом состоянии водоемов разрабатываются все новые способы их диагностики [1–10]. Диагностика водоемов, функционирующих в природных условиях или находящихся под антропогенным воздействием, основывается на системе наблюдений, оценки и прогноза ряда гидробиологических показателей. В условиях дефицита данных о трофическом состоянии водоемов система диагностики зачастую совмещается с моделированием [3, 9], позволяющим реконструировать наиболее важные биолого-продукционные характеристики водных объектов.

Значимость моделей для диагностики заключается в том, что они привлекают необходимую информацию из разных источников, анализируют ее и выявляют закономерные связи между биотическими и абиотическими компонентами водных экосистем. Цель исследования – опираясь на знания этих связей, разработать систему диагностики продукции ключевых групп водных организмов, используя в качестве аргументов абиотические факторы, влияющие на жизнедеятельность гидробионтов и функционирование водных экосистем в целом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Система диагностики (СД) биологической продуктивности водных экосистем (рис. 1) – это сжатый вариант балансовой модели биотического потока энергии в озере, находящемся под воздействием окружающей среды – суши и атмосферы [11]. Взаимоотношения между организмами разных трофических уровней заключены в «черный ящик», а вместо них используются связывающие эти уровни переходные коэффициенты и уравнения, включая логические. Входные параметры системы диагностики легко определяемы либо доступны в справочных источниках. Система не включает в число входных параметров содержание общего фосфора в воде (TP), т. к. определение этого показателя технологически трудоемко и затратно, несмотря на то что показатель относится к разряду лимитирующих рост фитопланктона факторов. Расчет потока фосфора в водную среду с водосборного бассейна и с атмосферными осадками производится с использованием доступной информации о среднегодовой температуре воздуха (T_{em}) и годовой сумме осадков (Pre). Принято во внимание, что не только продукция фитопланктона, но и аллохтонное РОВ (растворенное органическое вещество) – важный источник энергии для гетеротрофных микроорганизмов. Показателем количества аллохтонного РОВ в озере выбрана цветность воды (P_t) – легко определяемый гидрохимический показатель.

Установление трофического типа озера (олиготрофный, мезотрофный, эвтрофный тип или переходные состояния) – одна из фундаментальных проблем лимнологии. Диагностическая система реконструирует, прогнозирует и количественно оценивает показатели трофического статуса водое-



ма: продукцию фитопланктона (P_{php}), макрофитов (P_{mac}), микрофитобентоса (P_{phb}), эпифитов (P_{epi}), зоопланктона (P_{zpl}), зообентоса (P_{zbc}), рыб (FP) и допустимый (без подрыва популяции) вылов рыб (FY). Последние два показателя актуальны для разработки рационального подхода к использованию биологических ресурсов водоемов разного типа. Для испытания СД были выбраны семь озер, расположенных в гумидной зоне, на территории Российской Федерации и Республики Беларусь.

Озеро Кривое находится на севере Карелии в бассейне Чупинской губы Кандалакшского залива Белого моря. Площадь зеркала всего 0,5 км². Впервые озеро исследовали в 1968 и 1969 гг. в рамках Международной биологической программы под руководством Г.Г. Винберга [12, 13]. Онежское – второе по величине озеро Европы (после Ладожского). В него впадают 52 реки, главные притоки – Водла, Шуя и Суна. Вытекает из озера р. Свирь, впадающая в Ладожское озеро. Площадь зеркала Онежского озера 9720 км² [14–16]. Ладожское озеро – крупнейшее в Европе, его водосборная площадь включает Онежское озеро, озера Ильмень и Сайму. Сток воды происходит через

р. Неву, соединяющую озеро с Невской губой Финского залива. Площадь зеркала озера – 17 870 км² [17]. Оз. Красное находится в центральной части Карельского перешейка в бассейне р. Вуоксы. Площадь зеркала 9,13 км². Из-за интенсивной застройки на берегах велика антропогенная составляющая фосфорной нагрузки на озеро [18].

Нарочанская группа озер Республики Беларусь представлена тремя связанными между собой озерами – Баторино, Мястро и Нарочь. Площадь их зеркала – 6,3; 13,1 и 79,6 км² соответственно. Общий для всех трех озер водосбор дренируется 17 ручьями [19]. Наблюдается существенное деэвтрофирование озер, обусловленное снижением на них антропогенной нагрузки [20]. Основные географические, морфометрические и гидрохимические показатели озер приведены в табл. 1.

Для построения СА (рис. 1) привлечена программа Stella [10, 21, 22]. В качестве входных параметров используются следующие независимые переменные: Lat – географическая широта, °с.ш.; SDA – удельный водосбор; Tem – среднегодовая температура воздуха, °С; Pre – годовая сумма осадков, мм/год; D_{mean} и D_{max} – средняя и максимальная глубины озера, м; T_w – время пребывания воды в озере, год; Pt – цветность воды в озере, градус цветности; DAN – суточное ассимиляционное число хлорофилла *a* фитопланктона, мг С/(мг·сут); F_{eu} – фактор эвтрофирования озера, который при отсутствии антропогенной нагрузки равен 1.

Промежуточные параметры – производные входных параметров, используемые при вычислении целевых параметров:

FF = 3 D_{mean} / D_{max} – фактор формы котловины озера;

GS = - 0,058 Lat² + 0,549 Lat + 365 – длительность вегетационного сезона (день) для озер Европы [10, 23];

Lit = (1 - ((D_{max} - 2 Sec) / (D_{max} + 2 Sec · EXP (3 - FF^{1,5})))^{0,5/FF}) 100 – отношение площади литоральной зоны к площади озера, % [24];

M_{cov} = IF (Lat < 55) THEN (56,5 (Sec / D_{mean})) ELSE (23,6 (Sec / D_{mean})) – степень зарастания озера макрофитами, % [25]. В этом логическом уравнении зафиксировано допущение, что на высоких широтах степень зарастания ниже, чем на низких из-за смены мягких грунтов на каменистые субстраты;

TP = 1000 ((SDA · 0,1 · 0,002 · 0,02 P_{ter} · 2^{(Tem-12)/10} · F_{eu} + 0,00003 Pre) (1 - 5 / (5 + D_{mean} / T_w)) / D_{mean} – содержание общего фосфора в воде, мкг/л. Коэффициенты: 0,1 – отношение массы органического углерода к ее калорийности; 0,002 – соотношение Р:С в растительном материале суши [26]; 0,02 – средняя для планеты доля выноса фосфора в водоемы из наземных экосистем с природным ландшафтом [27]; 0,00003 – среднее содержание TP в атмосферных осадках, г/л [28];

$Chl = 0,103 \cdot TP^{1,29}$ – содержание хлорофилла а в планктоне, мкг/л [29];

$Sec = 10^{(1,26 - 0,31 \cdot LOG(Pt) - 0,36 \cdot LOG(TP))}$ – прозрачность воды в озере, м [30].

Целевые параметры:

$P_{ter} = (3000 / (1 + EXP(1,315 - 0,119 \cdot Tem))) \cdot 4$ – продукция наземной растительности на водосборе, ккал/(м² · год) [31, 32];

$P_{php} = (IF(2 \cdot Sec > D_{mean}) THEN (DAN \cdot Chl \cdot D_{mean} \cdot (1 - D_{mean} / (4 \cdot Sec)) \cdot GS / 100) ELSE (DAN \cdot Chl \cdot Sec \cdot GS / 100)) \cdot 0,8$ – продукция фитопланктона, ккал/(м² · год). Это логическое уравнение учитывает тот факт, что в отдельных водоемах потенциальная глубина фотического слоя может превышать среднюю глубину;

$P_{mac} = 10^{(2,21 + 1,08 \cdot LOG(M_{cov}) - 0,49 \cdot (90 / (90 - Lat)))}$ – продукция макрофитов, ккал/(м² · год);

$P_{epi} = 0,16 \cdot P_{mac}$ – продукция эпифитов, ккал/(м² · год);

$P_{phb} = (0,32 \cdot P_{php} \cdot Lit) / 100$ – продукция микрофитобентоса, ккал/(м² · год) [25];

$PP = P_{mac} + P_{epi} + P_{phb} + P_{php}$ – суммарная первичная продукция, ккал/(м² · год);

$P_{bcp} = 0,2 \cdot P_{php} + 10 \cdot (Pt / 12) \cdot 0,0025 \cdot 0,33 \cdot D_{mean} \cdot GS$ – продукция бактериопланктона с учетом потребленного им аллохтонного РОВ, ккал/(м² · год). Коэффициент 0,2 означает, что ~20 % продукции фитопланктона трансформируется в бактериальную продукцию; 10 – калорийность органического углерода, ккал/г; Pt/12 – концентрация аллохтонного РОВ, мг С/л; 0,0025 – константа скорости утилизации аллохтонного РОВ бактериопланктоном, сут⁻¹ [33]; 0,33 – эффективность роста бактериопланктона;

$P_{zpl} = 0,59 \cdot 0,16 \cdot (P_{php_hzo} + P_{bcp})$ – продукция зоопланктона, ккал/(м² · год), где коэффициент 0,59 – отношение продукции планктонного сообщества к продукции нехищного зоопланктона; 0,16 – эффективность роста нехищного зоопланктона; $P_{php_hzo} = P_{php} \cdot (1 - 0,2 / 0,33 - 0,1 / (0,3 \cdot D_{mean}))$ – продукция фитопланктона, потребленная нехищным зоопланктоном; 0,2/0,33 – доля продукции фитопланктона, ассимилированная бактериопланктоном; 0,1 – скорость седиментации фитопланктона, м/сут [34]; 0,3 – скорость оборота биомассы фитопланктона, сут⁻¹;

$P_{zbe} = 0,133 \cdot (P_{mac} + P_{epi} + P_{phb})$ – продукция зообентоса, ккал/(м² · год);

$P_{plf} = 0,08 \cdot P_{zpl}$ – продукция планктоноядных рыб, ккал/(м² · год);

$FP = 0,0037 \cdot PP$ – продукция рыбного сообщества, ккал/(м² · год);

$FY = FP / 3$ – вылов рыб без ущерба популяции, ккал/(м² · год).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Значения входных параметров и спрогнозированных на их основе промежуточных и целевых параметров биологической продуктивности озер представлены в табл. 1. Верификация показаний системы диагностики проводилась по данным гидробиологических исследований Онежского озера [14–16]. Установлено сходство прогнозируемых величин продукции гидробионтов с результатами натуральных наблюдений (рис. 2).

Основным маркером трофического статуса водоемов принято считать содержание Chl в планктоне. Система диагностики прогнозирует величину Chl для экосистемы, функционирующей в условиях близких к природным. Если установленное эмпирическим путем содержание Chl превышает прогнозируемую величину, это свидетельствует об эвтрофировании водоема. В данном случае соответствующая поправка (в виде коэффициента F_{eu}) вводится в уравнение, описывающее зависимость TP от P_{ter} и P_{re} (см. промежуточные параметры), чтобы приблизить прогнозируемое значение Chl к эмпирическому. Так как в СД входные, промежуточные и целевые параметры взаимосвязаны, корректировка Chl приведет к изменению всех остальных показателей трофического состояния экосистемы.

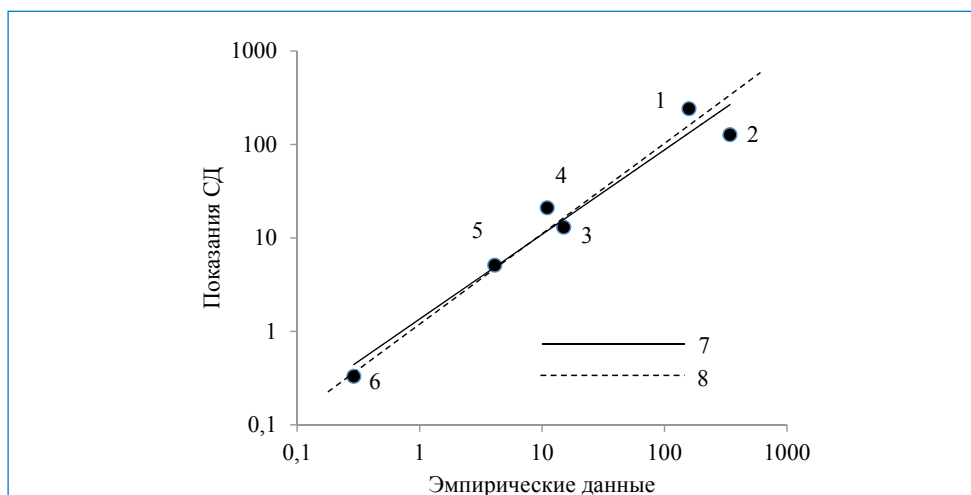


Рис. 2. Сравнение эмпирических данных для Онежского озера с показаниями системы диагностики (СД): 1 – продукция фитопланктона; 2 – бактериопланктона; 3 – макрофитов; 4 – зоопланктона; 5 – зообентоса; 6 – вылов рыбы; 7 – линия регрессии; 8 – линия симметрии.

Fig. 2. Comparison of empiric data for the Lake Onega with the diagnostics system indications: production of 1 – phytoplankton; 2 – bacterioplankton; 3 – macrophytes; 4 – zooplankton; 5 – zoobenthos; 6 – fish catch; 7 – regression line; 8 – symmetry line.

Таблица 1. Входные и спрогнозированные на их основании средние значения промежуточных и целевых параметров для некоторых озер Российской Федерации и Республики Беларусь
 Table 1. Input parameters and predicted medium values of intermediate and target parameters for some lakes of the Russian Federation and the Republic of Belarus

Параметры	Озера						
	Российская Федерация				Республика Беларусь		
	Кривое	Онежское	Красное	Ладожское	Баторино	Мястро	Нарочь
Входные							
Lat	66,5	61,5	61	60,6	54,97	54,87	54,85
SDA	4,2	5,82	18,4	14,5	14,6	10,2	3,5
Tem	0,5	3	3,6	3,7	6,3	6,4	6,4
Pre	523	592	615	648	498	507	515
D_{mean}	12	30	6,6	47	3	5	9
D_{max}	30	127	14,6	230	5,5	11,3	24,8
T_w	9,1	15,6	1,14	11,7	0,87	2,2	11
Pt	25	20	48	23	52	30	15
DAN	40	30	40	40	40	40	40
F_{eu}	1	1	3	1,5	1	1	1
Промежуточные							
GS	145	179	183	185	220	221	221
FF	1,2	0,71	1,4	0,61	1,6	1,4	1,1
Lit	37	30	26	18	45	38	46
M_{cov}	7,1	2,6	5,1	1,2	33	23	22
TP	6	9	42	21	22	18	10
Chl	1	1,5	13	5,3	5,5	4,4	2
Sec	3,5	3,3	1,4	2,3	1,8	2,2	3,5
Целевые							
P_{ter}	2662	3316	3492	3534	4357	4381	4392
P_{php}	161	234	1053	728	687	690	469
P_{mac}	18	13	28	6	390	270	250
P_{epi}	2,9	2,1	4,6	1	63	43	40
P_{phb}	19	23	87	42	99	85	70
PP	201	271	1173	777	1240	1088	830
P_{bcp}	62	122	268	281	161	161	115
P_{zpl}	11	20	60	53	34	37	27
P_{zbe}	5	4,5	22	6,4	69	48	40
P_{plf}	0,92	1,6	4,8	4,3	2,7	3	2,1
FP	0,76	1,1	3,8	2,8	4,7	3,9	3,1
FY	0,25	0,38	1,3	0,92	1,6	1,3	1

Система диагностики позволяет произвести ретроспективный прогноз трофического состояния озер Красного и Ладожского в период, предшествующий антропогенным преобразованиям на их водосборах. Приняв $F_{eu} = 1$, находим, что продукция фитопланктона до периода эвтрофирования составляла в оз. Красном ~410, в Ладожском ~520 ккал/(м²·год), что в 2,5 и 1,4 раза ниже, чем на современном этапе (табл. 2).

По результатам СД в направлении от высоких широт к более низким (Lat от 66,50 до 550 с.ш.) продукция наземной растительности на водосборной площади увеличивается от ~2660 до ~4400 ккал/(м²·год). Наименьшая продукция фитопланктона прогнозируется в олиготрофном оз. Кривом, наибольшая – в оз. Красном, подверженном антропогенному воздействию (табл. 1).

Суммарная первичная продукция, включающая продукцию фитопланктона макрофитов, эпифитов и микрофитобентоса, изменяется, согласно СД, от 200 в оз. Кривом до 1200 ккал/(м²·год) в оз. Красном (табл. 1). Доля продукции фитопланктона в суммарной первичной продукции высока в северных озерах (80–94 %). Она заметно ниже в озерах Беларуси (55–64 %), имеющих обширную литоральную зону.

Таблица 2. Продукция фитопланктона и суммарная первичная продукция в озерах Красное и Ладожское на современном этапе и реконструкция показателей в период, предшествующий эвтрофированию водоема, ккал/(м²·год). Коэффициенты эвтрофирования F_{eu} указаны в табл. 1.
Table 2. Phytoplankton production and total primary production in lakes Krasnoye and Ladoga at the current stage and reconstruction of indicators for the pre-eutrophication period, kcal/(m² year). Eutrophication indices F_{eu} are given in Table 1.

Озеро	Продукция фитопланктона		Суммарная первичная продукция	
	на современном этапе	до периода эвтрофирования	на современном этапе	до периода эвтрофирования
Красное	1050	410	1170	500
Ладожское	730	520	780	560

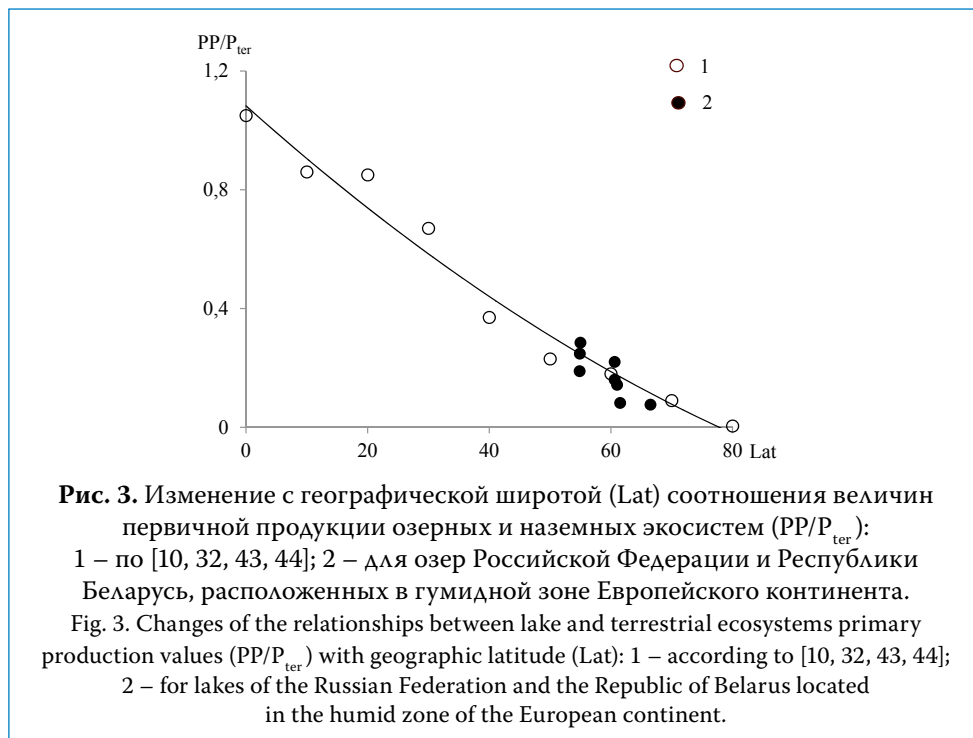
В тех случаях, если озера окружены природным ландшафтом и практически не затронуты эвтрофированием ($F_{eu} \approx 1$), суммарная первичная продукция коррелирует с продукцией наземной растительности на водосборе:

$$PP = (2 \cdot 10^{-10}) P_{ter}^{3.483}, n = 7, R^2 = 0.91, \quad (1)$$

где PP и P_{ter} в ккал/(м²·год). По (1) соотношение PP/ P_{ter} повышается от севера к югу в среднем от 0,075 до 0,2, что совпадает с общей тенденцией роста PP относительно P_{ter} в направлении от Арктики к тропическому поясу (рис. 3).

Бактерии способны использовать, помимо автохтонного РОВ (продукции фитопланктона), иной источник энергии – аллохтонное РОВ. Вычислительные эксперименты, выполненные с использованием системы диагностики, показали, что продукция бактерий за счет ассимиляции аллохтонного РОВ составляет от 15 до 60 % суммарной продукции бактерий (табл. 3).

Продукция зоопланктона – это сумма продукций хищного и нехищного зоопланктона за вычетом рациона хищного зоопланктона. По результатам СД, вклад фитопланктона и бактериопланктона в продукцию нехищного зоопланктона примерно одинаковый (табл. 3). Рыбопродуктивность водоемов находится в прямой зависимости от продукции фитопланктона, хотя они связаны между собой промежуточными трофическими звеньями. Эта зависимость имеет большое практическое значение и издавна обсуждается в гидробиологической литературе [35–39]. По результатам СД в продукцию рыб трансформируется всего лишь ~0,5 % продукции фитопланктона.



Анализ зависимости величин P_{php} от Lat впервые был произведен по материалам Международной биологической программы [40]. Обобщив данные для 55 озер и водохранилищ, авторы пришли к заключению, что годовая первичная продукция планктона возрастает от высоких широт

(74° с.ш., оз. Чар, Канада) к низким (10–12° с.ш., озера и водохранилища Индии) от 35 до 12000 ккал/м². Однако, несмотря на большой диапазон величин первичной продукции, была получена относительно слабая корреляция с географической широтой ($R^2 = 0,56$). К такому же выводу пришли и другие ученые [41, 42]. По более поздним и достаточно обширным данным, охватывающим водоемы от 2° с.ш. (Африка) до 81° с.ш. (архипелаг Земля Франца-Иосифа), географическая широта объясняет 60 % изменчивости годовой продукции фитопланктона [10]. Корреляция между P_{php} и Lat становится более тесной, если использовать в качестве аргумента значения Lat в трансформированном виде [10]:

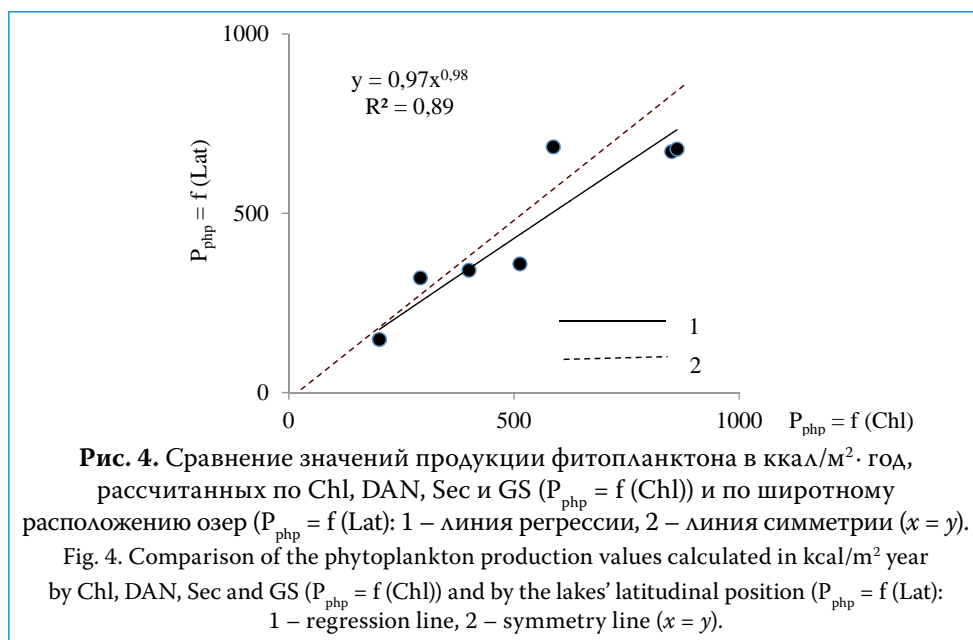
Таблица 3. Продукция бактериопланктона за счет ассимиляции аллохтонного РОВ ($P_{bcp[all]}$, ккал/(м² · год)), ее доля в общей продукции бактериопланктона ($P_{bcp[all]}/P_{bcp}$), продукция нехищного зоопланктона за счет потребления фитопланктона ($P_{hzo[php]}$, ккал/(м² · год)) и ее доля в общей продукции нехищного зоопланктона ($P_{hzo[php]}/P_{hzo}$)

Table 3. Bacterioplankton production due to allochthonic DOM assimilation ($P_{bcp[all]}$, kcal/(m² · year)), its share in the bacterioplankton total production ($P_{bcp[all]}/P_{bcp}$), nonpredatory zooplankton production due to phytoplankton consumption ($P_{hzo[php]}$, kcal/(m² · year)) and its share in the total nonpredatory zooplankton production ($P_{hzo[php]}/P_{hzo}$)

Озеро	$P_{bcp[all]}$	$P_{bcp[all]}/P_{bcp}$	$P_{hzo[php]}$	$P_{hzo[php]}/P_{hzo}$
Кривое	30	0,48	9,4	0,49
Онежское	75	0,61	14	0,42
Красное	58	0,22	58	0,57
Ладожское	135	0,48	45	0,50
Баторино	23	0,14	31	0,54
Мястро	24	0,15	37	0,59
Нарочь	21	0,18	27	0,60

$$P_{php} = 10^{(-1,86 (90/(90 - Lat))^{0,5} + 5,81)}, n = 63, R^2 = 0,74. \quad (2)$$

В этом случае 74 % изменчивости P_{php} объясняется широтной поясностью. Важно подчеркнуть, что обсуждаемая зависимость практически не уступает по прогностической силе широко известным моделям, где в качестве x -переменной используется общий фосфор. Обнаруживается сходство значений P_{php} , установленных на основании широтного расположения озер (уравнение 2) и вычисленных по Chl, DAN, Sec и GS с помощью СД (рис. 4).



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная гидробиология призвана решать дуалистические проблемы. Повышение рыбопродуктивности водоемов неизбежным образом сопровождается их эвтрофированием и снижением качества воды. Эвтрофирование выгодно для рыбохозяйственных целей, т. к. повышение первичной продукции, как показано выше, стимулирует рыбопродуктивность. Одним из этапов поиска «золотой середины» в решении вопросов о рациональном использовании водных ресурсов может стать разработка трофической классификации с установлением норм качества воды для водоемов питьевого, рекреационного и рыбохозяйственного назначения.

Этому процессу могут способствовать изложенные в данной статье уравнения для оценки продукции ключевых групп гидробионтов. Они отражают закономерные связи между продукционными характеристиками и факторами внешней среды, включая географическое расположение водоемов. Безусловно, эти связи будут уточняться путем дальнейшего накопления знаний о соотношениях биолого-продукционных показателей в экосистемах с разным уровнем трофности, расположенных в различных регионах и климатических зонах. Тем не менее, следует констатировать, что общая картина биотических связей прослеживается достаточно отчетливо и может быть использована в гидробиологической практике для диагностики и прогнозирования экологического состояния водных объектов в изменяющихся условиях внешней среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шитиков В.К., Зинченко Т.Д., Головатюк А.В. Нейросетевые методы оценки качества вод по гидробиологическим показателям // Известия Самарского НЦ РАН. 2002. Т. 4. № 2. С. 280–289.
2. Olden J.D., Jackson D.A. Illuminating the «black box»: a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks // Ecol. Modelling. 2002. Vol. 154. P. 135–150
3. Меншуткин В.В., Филатов Н.Н. Разработка экспертной системы «озера Карелии» // Водная среда: комплексный подход к изучению, охране и использованию. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 18–26.
4. Булгаков Н.Г., Максимов В.Н., Левич А.П., Юзбеков А.К., Рисник Д.В. Экологический прогноз изменения состояния водных экосистем // Успехи современной биологии. 2010. Т. 130. № 5. С. 435–445.
5. Mooij W. M., Trolle D., Jeppesen E. et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches // Aquat. Ecol. 2010. Vol. 44. P. 633–667.
6. Кренева С.В., Матишов Г.Г., Кренева К.В. К методологии контроля загрязнения и состояния водных экосистем // Вестник Южного НЦ РАН. 2014. Т. 10. № 4. С. 73–79.
7. Меншуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор). 2. Модели экосистем пресноводных озер // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 24–38.
8. Костина Н.В. Информационная система REGION: 25 лет работы и практического применения // Известия Самарского НЦ РАН. 2015. Т. 17. № 4. С. 15–24.
9. Калинкина Н.М., Коросов А.В., Сярки М.Т. К созданию экспертной системы Онежского озера: оптимизация мониторинга состояния экосистемы по показателям зоопланктона // Принципы экологии. 2017. № 1. С. 117–132.
10. Håkanson L., Boulion V.V. The Lake Foodweb – modelling predation and abiotic/biotic interactions. Leiden: Backhuys Publishers, 2002. 344 p.
11. Бульон В.В. Биотический поток вещества и энергии в системе «озеро и его водосбор» // Успехи современной биологии. 2018. Т. 138. № 5. С. 503–513.
12. Биологическая продуктивность северных озер. Т. 1 / под ред. Г.Г. Винберга. Л.: Наука, 1975. 228 с.
13. Винберг Г.Г. Особенности экосистем пресноводных водоемов (из итогов советских исследований по Международной биологической программе) // Известия АН СССР. Сер. биол. 1975. № 1. С. 83–93.
14. Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / под ред. З.С. Кауфмана Л.: Наука, 1990. 264 с.
15. Онежское озеро. Экологические проблемы / под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 259 с.
16. Тимакова Т.М., Сабылина А.В., Полякова Т.Н., Сярки М.Т., Теканова Е.В., Черышева Т.А. Современное состояние экосистемы Онежского озера и тенденция ее изменения за последние десятилетия // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 42–49.
17. Румянцев В.А., Кудерский Л.А. Ладожское озеро: общая характеристика, экологическое состояние // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2010. № 1. С. 171–182.

18. Многолетние изменения биологических сообществ мезотрофного озера в условиях климатических флуктуаций и эвтрофирования / под ред. И.С. Трифоновой. СПб.: Изд-во «ЛЕМА», 2008. 246 с.
19. Экологическая система Нарочанских озер / под ред. Г.Г. Винберга. Минск: Изд-во «Университетское», 1985. 303 с.
20. Михеева Т.М., Ковалевская Р.З., Лукьянова Е.В. Показатели количественного развития и функционирования фитопланктона Нарочанских озер в разные периоды эволюции их трофического статуса // Состояние и проблемы продукционной гидробиологии. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2006. С. 199–211.
21. Ащепкова Л.Я. Применение программного пакета Stella для моделирования сложных систем. Владивосток: ДВГУ, 2002. 27 с.
22. Клековский Р.З., Менишуткин В.В. Экологическое моделирование на языке Stella. Международный экологический центр Польской Академии наук, Дзеканов Лесны. 2003. 159 с.
23. Håkanson L., Boulion V.V. A practical approach to predict the duration of the growing season for European lakes // Ecol. Modelling. 2001. Vol. 140. P. 243–245.
24. Håkanson L. Water pollution – methods and criteria to rank, model and remediate chemical threats to aquatic ecosystems. Leiden: Backhuys Publishers, 1999. 299 p.
25. Бульон В.В. Вклад основных групп автотрофных организмов в первичную продукцию водоемов // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 1. С. 98–108.
26. Эволюция круговорота фосфора и эвтрофирование природных вод / под ред. К.Я. Кондратьева и И.С. Коплан-Дикса. Л.: Наука, 1988. 204 с.
27. Коплан-Дикс И.С., Назаров Г.В., Кузнецов В.К. Роль минеральных удобрений в эвтрофировании вод суши. Л.: Наука, 1985. 182 с.
28. Савенко В.С. Фосфор в атмосферных осадках // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 2. С. 189–199.
29. Бульон В.В. Новый взгляд на парадигму фосфорного контроля в лимнологии // Успехи современной биологии. 2016. Т. 136. № 3. С. 311–318.
30. Nürnberg G.K., Shaw H. Productivity of clear and humic lakes: nutrients, phytoplankton, bacteria // Hydrobiologia. 1998. Vol. 382. Iss.1–3. P. 97–112.
31. Lieth H. Primary production terrestrial ecosystems // Human Ecology. 1972. Vol. 1. P. 303–332.
32. Лит Х. Моделирование первичной продуктивности Земного шара. Экология. 1974. № 2. С. 13–23.
33. Бульон В.В. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество в трофической цепи озерных экосистем // Труды ЗИН РАН. 2017. Т. 321. № 2. С. 115–128.
34. Даценко Ю.С., Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К. Анализ влияния абиотических факторов на развитие фитопланктона в малопроточном стратифицированном водохранилище // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 10. С. 73–85.
35. Ивлев В.С. Интенсивность фотосинтеза и рыбная продукция прудов // Бюллетень МОИП. Отд. Биол. 1939. Т. 48 (1). С. 29–34.
36. Винберг Г.Г., Ляхнович В.П. Удобрение прудов. М.: Легкая промышленность, 1965. 271 с.

37. *Oglesby R.T.* Relationships of fish yield to lake phytoplankton standing crop, production, and morphoedaphic factors // *J. Fish. Res. Board Canada*. 1977. Vol. 34. № 12. P. 2271–2279.
38. *Morgan N.C.* Transfer efficiency // *The functioning of freshwater ecosystems*. Cambridge: University Press, 1980. P. 329–334.
39. Бульон В.В., Винберг Г.Г. Соотношение между первичной продукцией и рыбопродуктивностью водоемов // *Основы изучения пресноводных экосистем*. Л.: Наука, 1981. С. 5–10.
40. *Brylinsky M., Mann K.H.* An analysis of factors governing productivity in lakes and reservoirs // *Limnol. Oceanogr.* 1973. Vol. 18. № 1. P. 1–14.
41. *Schindler D.W.* Factors regulating phytoplankton production and standing crops in the world's freshwater // *Limnol. Oceanogr.* 1978. Vol. 23. № 3. P. 478–486.
42. Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб: Наука, 2000. 147 с.
43. *Straškraba M.* The effects of physical variables on freshwater production: analyses based on models // *The functioning of freshwater ecosystems*. Cambridge: Univ. Press, 1980. P. 13–84.
44. Бульон В.В. Влияние географических факторов на первичную продукцию озерных и наземных экосистем // *Водные ресурсы*. 2007. Т. 34. № 5. С. 565–572.

Для цитирования: Бульон В.В. Диагностика биологической продуктивности озерных экосистем // *Водное хозяйство России*. 2019. № 3. С. 110-126.

Сведения об авторе:

Бульон Виктор Валентинович, д-р биол. наук, профессор, ФГБУН «Зоологический институт Российской Академии наук» (ЗИН РАН), Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 1; e-mail: vboulion@mail.ru

DIAGNOSING OF BIOLOGICAL PRODUCTIVITY IN LAKE ECOSYSTEMS

Viktor V. Boulion

Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint - Petersburg, Russia

Abstract: This work presents the system for biological productivity estimation in lake ecosystems. Input parameters of system (x – variables) are latitude, specific catchment area, average annual air temperature, annual sum precipitation, mean and maximum water body depth, water retention time in lake, average for growing season water color and daily assimilation number for phytoplankton chlorophyll. Under the conditions of lack of data on the water bodies' environmental status, the diagnostic system is often combined with modelling that enables to reconstruct the most important biological/production characteristics of water bodies. Diagnostic models are significant as with their help it is possible, with the appropriate database, to withdraw and concentrate all necessary information and present it in quantitative form. One of database was created for lakes and reservoirs located on the territory of the former Soviet Union and adjacent regions. Main data array was collected by Soviet scientists in 60–80's of the past century within the framework of the International Biological Program, UNESCO program “Man and Biosphere”, and a set of public and international projects. Summarizing and analysis of the collected data made it possible to reveal and represent in quantitative form a set of the regular ties between biotic and abiotic

components in aquatic ecosystems. The goal of investigation was to develop the system of diagnosis for indicative biological characteristics – production of the key hydrobiont groups (producers, reducers, and consumers including fish). Abiotic factors that determine organisms' vital activities and aquatic ecosystems' functioning have been used as arguments. Some lakes of Russian Federation and Republic of Belarus related to humic zone of European continent have been the objects of the investigation.

Key words: diagnosing of water body, production of terrestrial phytomass, hydrobiont production, fish productivity, environmental factors, eutrophication factor.

About the author: Viktor V. Boulion, Dr. of Biological Sciences, Professor, Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, Universitetskaya nab., 1, Saint - Petersburg, 199034 Russia e-mail: vboulion@mail.ru

For citation: Boulion V.V., *Diagnosing of Biological Productivity in Lake Ecosystems// Vodnoye khozyaystvo Rossii [Water Sector of Russia], No. 3. 2019. P. 110-126.*

REFERENCES

1. *Shitikov V.K., Zinchenko T.D., Golovatiuk L.V.* Neurosetevye metody otsenki kachestva vod po gidrobiologicheskim pokazateliam [Neuronet methods for water quality assessment by hydro/biological indicators] // *Izv. Samarskogo NTs RAN.* 2002.T. 4. № 2. S. 280–289. [in Russian]
2. *Olden J.D., Jackson D.A.* Illuminating the “black box”: a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks // *Ecol. Modelling.* 2002. V. 154. P. 135–150
3. *Menshutkin V.V., Filatov N.N.* Razrabotka ekspertnoi sistemy «ozera Karelii» [Development of the “Lakes of Karelia” expert system] // *Vodnaia sreda: kompleksnyi podkhod k izucheniiu, okhrane i ispol'zovaniuu.* Petrozavodsk: Kar. NTs RAN, 2008. S. 18 – 26. [in Russian]
4. *Bulgakov N.G., Maksimov V.N., Levich A.P., Iuzbekov A.K., Risnik D.V.* Ekologicheskii prognoz izmeneniia sostoianiia vodnykh ekosistem [Ecological forecast of the aquatic ecosystems' status changes] // *Uspekhi sovremennoi biologii.* 2010. T. 130. № 5. S. 435–445. [in Russian]
5. *Mooij W. M., Trolle D., Jeppesen E. et al.* Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches // *Aquat. Ecol.* 2010. V. 44. P. 633–667.
6. *Kreneva S.V., Matishov G.G., Kreneva K.V.* K metodologii kontrolya zagriazneniia i sostoianiia vodnykh ekosistem [On the methodology of the aquatic ecosystems pollution and status control] // *Vestnik Iuzhnogo NTs RAN.* 2014. T. 10. № 4. S. 73–79. [in Russian]
7. *Menshutkin V.V., Rukhovets L.A., Filatov N.N.* Modelirovanie ekosistem presnovodnykh ozer (obzor). 2. Modeli ekosistem presnovodnykh ozer [Simulating of the fresh water lake ecosystems (review). 2. Models of the fresh water lakes' ecosystems] // *Vodnye resursy.* 2014. T. 41. № 1.S. 24–38. [in Russian]
8. *Kostina N.V.* Informatsionnaia sistema REGION: 25 let raboty i prakticheskogo primeneniia [REGION information system: 25 years of operation and practical application] // *Izv. Samarskogo NTs RAN.* 2015. T. 17. № 4. S. 15 – 24. [in Russian]
9. *Kalinkina N.M., Korosov A.V., Siarki M.T.* K sozdaniuu ekspertnoi sistemy Onezhskogo ozera: optimizatsiia monitoringa sostoianiia ekosistemy po pokazateliam zooplanktona [On the formation of the Lake Onega expert system: optimization of the ecosystem status monitoring by zooplankton indicators] // *Printsipy ekologii.* 2017. № 1. S. 117–132. [in Russian]
10. *Håkanson L., Boulion V.V.* The Lake Foodweb – modelling predation and abiotic/biotic interactions. Leiden: Backhuys Publishers, 2002. 344 p.

11. *Boullion V.V.* Bioticheskiy potok veshchestva i energii v sisteme «ozero i ego vodosbor». [Biotic flow of matter and energy in the “lake and its catchment” system] *Uspekhi sovremennoi biologii*. 2018. T. 138. № 5. S. 503 – 513. [in Russian]
12. Biologicheskaya produktivnost' severnykh ozer. [The Northern lakes biologic productivity] V. 1 /pod red. G.G. Vinberga /. L.: 305 Nauka, 1975. 228 s. [in Russian]
13. *Vinberg G.G.* Osobennosti ekosistem presnovodnykh vodoemov (iz itogov sovetskikh issledovaniy po Mezhdunarodnoi biologicheskoi programme) [Specific features of the fresh water bodies (from the history of Soviet researches according to the International Biological Program)] // *Izv. AN SSSR. Ser. biol.*1975. № 1, S. 83 – 93. [in Russian]
14. Ekosistema Onezhskogo ozera i tendentsii ee izmeneniia [The Lake Onega ecosystem and the trends of its alteration] /pod red. Kaufmana Z.S./ . L.: Nauka, 1990. 264 s. [in Russian]
15. Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy [The Lake Onega. Environmental problems] /pod red. N.N. Filatova /. Petrozavodsk: KarNTs RAN, 1999. 259 s. [in Russian]
16. *Timakova T.M., Sabylina A.V., Poliakova T.N, Siarki M.T., Tekanova E.V., Chekryzheva T.A.* Sovremennoe sostoianie ekosistemy Onezhskogo ozera i tendentsii ee izmeneniia za poslednie desiatiletii [Current state of the Lake Onega and the trends of its alteration over the past decades] // *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2011. № 4. S. 42–49. [in Russian]
17. *Rumiantsev V.A., Kuderskiy L.A.* Ladozhskoe ozero: obshchaya kharakteristika, ekologicheskoe sostoianie [The Lake Ladoga: general characteristics and environmental status] // *Obshchestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana)*. 2010. № 1. S. 171-182. [in Russian]
18. Mnogoletnie izmeneniia biologicheskikh soobshchestv mezotrofnogo ozera v usloviakh klimaticheskikh fluktuatsii i evtrofirovaniia [Many-year changes of the mezotrophic lake biological community under the conditions of climatic fluctuations and eutrophication] /pod red. I.S. Trifonovoi/. SPb.: Iz-vo «LEMA», 2008. 246 s. [in Russian]
19. Ekologicheskaya sistema Narochanskikh ozer [The Narochansk lakes ecological system]/ pod red. G.G. Vinberga /. Minsk: Izd-vo “Universitetskoe”, 1985. 303 s.
20. *Mikheeva T.M., Kovalevskaya R.Z., Luk'yanova E.V.* Pokazateli kolichestvennogo razvitiia i funktsionirovaniia fitoplanktona Narochanskikh ozer v raznye periody evoliutsii ikh troficheskogo statusa [The Narochansk lakes phytoplankton quantitative development and functioning indicators in the different periods of their trophic status evolution] // *Sostoianie i problemy produktsionnoi gidrobiologii*. M.: Tovarishchestvo nauch. izd. KMK, 2006. S. 199–211. [in Russian]
21. *Ashchepkova L.Ia.* Primenenie programmnoho paketa Stella dlia modelirovaniia slozhnykh sistem. [The STELLA software package application for simulating of complicated systems] Vladivostok: DVGU, 2002. 27 s. [in Russian]
22. *Klekovskiy R.Z., Menshutkin V.V.* Ekologicheskoe modelirovanie na iazyke Stella. [Ecological simulation in the STELLA language] *Mezhdunarodnyi ekologicheskii tsentr Pol'skoi Akademii nauk, Dzekanov Lesny*. 2003. 159 s. [in Russian]
23. *Håkanson L., Boullion V.V.* A practical approach to predict the duration of the growing season for European lakes // *Ecol. Modelling*. 2001. V. 140. P. 243–245.
24. *Håkanson L.* Water pollution – methods and criteria to rank, model and remediate chemical threats to aquatic ecosystems. Leiden: Backhuys Publishers, 1999. 299 p.
25. *Boullion V.V.* Vklad osnovnykh grupp avtotrofnikh organizmov v pervichnuiu produktsiiu vodoemov [The autotrophic organisms main groups' contribution to the water bodies' primary production] // *Vod. Resursy*. 2004. T. 31. № 1. S. 98–108. [in Russian]

26. Evoliutsiia krugovorota fosfora i evtrofirovanie prirodnykh vod [The phosphorous cycle evolution and natural waters' eutrophication] /pod red. K.Ia. Kondrat'eva i I.S. Koplana-Diksa/. L.: Nauka, 1988. 204 s. [in Russian]
27. *Koplan-Diks I.S., Nazarov G.V., Kuznetsov V.K.* Rol' mineral'nykh udobrenii v evtrofirovanii vod sushi. [The mineral fertilizers' role in the terrestrial waters eutrophication] L.: Nauka, 1985. 182 s. [in Russian]
28. *Savenko V.S.* Fosfor v atmosferynykh osadkakh [Phosphorous in atmospheric precipitation] // Vodnye resursy. 1996. T. 23. № 2. S. 189–199. [in Russian]
29. *Boulion V.V.* Novyi vzgliad na paradigmatu fosfornogo kontrolya v limnologii [A novel approach to the paradigm of phosphorous control in limnology] // Uspekhi sovremennoi biologii. 2016. T. 136. № 3. S. 311–318. [in Russian]
30. *Nürnberg G.K., Shaw H.* Productivity of clear and humic lakes: nutrients, phytoplankton-379 ton, bacteria // Hydrobiologia. 1998. V. 382. Iss. 1–3. P. 97–112.
31. *Lieth H.* Primary production terrestrial ecosystems // Human Ecology. 1972. V. 1. P. 303–332.
32. *Lieth H.* Modelirovanie pervichnoi produktivnosti Zemnogo shara [Simulating of the primary production of the Terrestrial Globe]. Ekologiya. 1974. № 2. S. 13–23. [in Russian]
33. *Boulion V.V.* Allokhthonnoe i avtokhthonnoe organicheskoe veshchestvo v troficheskoi tsepi ozernykh ekosistem [Allochthonic and autochthonic organic matter in trophic chain of the lake ecosystems] // Tr. ZIN RAN. 2017. T. 321. № 2. S. 115–128. [in Russian]
34. *Datsenko Iu.S., Puklakov V.V., Edel'shtein K.K.* Analiz vliianiia abioticheskikh faktorov na razvitie fitoplanktona v maloprotochnom stratifitsirovannom vodokhranilishche [Analysis of the abiotic factors impact on the phytoplankton development in a slow-running stratified reservoir] // Tr. Kar. NTs RAN. 2017. № 10. S. 73–85. [in Russian]
35. *Ivlev V.S.* Intensivnost' fotosinteza i rybnaia produktsiia prudov [The intensity of photosynthesis and fish production of the ponds] // Biul. MOIP. Otd. Biol. 1939. T. 48 (1). S. 29–34. [in Russian]
36. *Vinberg G.G., Liakhnovich V.P.* Udobrenie prudov [Fertilizing of ponds]. M.: Legkaia promyshlennost', 1965. 271 s. [in Russian]
37. *Oglesby R.T.* Relationships of fish yield to lake phytoplankton standing crop, production, and morphoedaphic factors // J. Fish. Res. Board Canada. 1977. V. 34. № 12. P. 2271–2279.
38. *Morgan N.C.* Transfer efficiency // The functioning of freshwater ecosystems. Cambridge: University Press, 1980. P. 329–334.
39. *Boulion V.V., Vinberg G.G.* Sootnoshenie mezhdru pervichnoi produktsiei i ryboproduktivnost'iu vodoemov [Correlation between primary production and fish productivity in water bodies] // Osnovy izucheniia presnovodnykh ekosistem. L.: Nauka, 1981. S. 5–10. [in Russian]
40. *Brylinsky M., Mann K.H.* An analysis of factors governing productivity in lakes and reservoirs // Limnol. Oceanogr. 1973. V. 18. № 1. P. 1 – 14.
41. *Schindler D.W.* Factors regulating phytoplankton production and standing crops in the world's freshwater // Limnol. Oceanogr. 1978. V. 23. № 3. P. 478–486. [in Russian]
42. *Alimov A.F.* Elementy teorii funktsionirovaniia vodnykh ekosistem [Elements of the theory of aquatic ecosystems' functioning]. SPb: Nauka, 2000. 147 s. [in Russian]
43. *Straškraba M.* The effects of physical variables on freshwater production: analyses based on models // The functioning of freshwater ecosystems. Cambridge: Univ. Press, 1980. P. 13–84.
44. *Boulion V.V.* Vliianie geograficheskikh faktorov na pervichnuiu produktsiiu ozernykh i nazemnykh ekosistem [The geographic factors' impact upon the lake and terrestrial ecosystems primary production] // Vod. Resursy. 2007. T. 34. № 5. S. 565–572. [in Russian].