

ОЦЕНКА влияния

ФИТОПЛАНКТОНА

на ПРОДУКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ **ЧЕБОКСАРСКОГО** ВОДОХРАНИЛИЩА

ПО растительным пигментам

Влияние фитопланктона на донные отложения оценивали по соотношению концентраций пигментов в грунтах с первичной продукцией и концентрацией хлорофилла *a* в воде. Установлено, что фитопланктон влияет на продукционные характеристики отложений незначительно в местах залегания песчаных наносов и более существенно в зонах илонакопления. Биомасса водорослей в отложениях водохранилища, рассчитанная по пигментам в среднегодовом слое, составляет 0,4–0,8 % первичной продукции фитопланктона.



Введение

Продукционные характеристики пелагиали и бентали взаимосвязаны, поэтому стратиграфические данные о свойствах донных отложений (ДО) используются для получения представлений о продукционно-деструкционных процессах в водной толще на разных этапах существования водных экосистем [1]. Однако оценка соотношения между продуктивностью фитопланктона и донного яруса экосистемы остается одной из проблем фундаментальной науки. К интегральным показателям продуктивности различных компонентов экосистемы относятся сведения о растительных пигментах, которые вместе с органическим веществом проходят весь путь его преобразований в трофической цепи — от новообразования в фотосинтезе до выывания из биотиче-

Л.Е. Сigareва*,
доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

Н.А. Тимофеева,
кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

ского круговорота. Особый интерес представляют водохранилища с искусственным регулированием уровня, различающиеся возрастом, антропогенной нагрузкой, морфометрическими параметрами, водным режимом и темпами седиментации взвеси. Некоторые подходы к оценке роли фитопланктона в формировании продукционных свойств дна водохранилищ были предложены в [2, 3]. В настоящей работе продолжено изучение этого вопроса.

Цель работы — оценить роль фитопланктона в формировании продуктивности донного яруса крупного эвтрофного водохранилища по растительным пигментам на примере Чебоксарского, характеризующегося высоким для волжского каскада водообменом.

Чебоксарское водохранилище — самое молодое в волжском каскаде, создано в 1981 г., относится к Средней Волге. Это крупное водохранилище долинного типа. При со-

*Адрес для корреспонденции: sigareva@ibiw.yaroslavl.ru

временном среднемноголетнем уровне воды 63,5 м БС его объем составляет 5,2 км³, площадь — 1200 км², длина — 340 км, средняя глубина — 4,7, максимальная — 23 м. Мелководная зона с глубинами до 2 м составляет около 30 % площади. Водные массы водохранилища формируются, в основном, за счет волжской воды, поступающей из Горьковского водохранилища, и вод крупных притоков — рек Ока, Сура, Ветлуга. Прозрачность воды обычно не превышает 1,5 м. В волжском каскаде водохранилище характеризуется максимальным коэффициентом водообмена (19,8 год⁻¹) и минимальными величинами скорости аккумуляции: средняя толщина слоя донных осадков 5 см, скорость осадконакопления 1,7 мм/год по данным 2010 г. [4]. Глубина размывающего действия волнения на дно (5–6 м) превышает среднюю глубину водоема. Структура грунтового комплекса в Чебоксарском водохранилище достаточно быстро достигла стадии относительной стабилизации по сравнению с другими волжскими водохранилищами. Площадь дна занята трансформированными грунтами (15 %), песчаными наносами (55 %) и илами (30 %). Главным источником осадочных пигментов в водохранилище является фитопланктон, поскольку зарастание акватории высшей водной растительностью незначительно (1,2 %) [5].

По содержанию в воде биогенных элементов и хлорофилла *a*, первичной продукции фитопланктона водохранилище эвтрофное, по

В.В. Законнов,
доктор географических наук, главный научный сотрудник, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

биомассе фитопланктона — мезотрофно-эвтрофное [6, 7], по средней биомассе зообентоса — высококормное для рыб-бентофагов [8].

Материалы и методы исследования

В работе использованы новые данные, полученные на Чебоксарском водохранилище в июле 2010 г. (с аномально жарким летом) в комплексной экспедиции ИБВВ РАН, а также опубликованные данные, полученные в августе 2001 г. [9]. В 2010 г. пробы отбирали из верхнего 5-см слоя отложений на 44 станциях (глубины 1–22 м, в среднем — 11,5 м) (рис. 1).

Для изучения вертикальной (временной) динамики концентрации пигментов были отобраны 3 колонки в зонах повышенной седиментации: против устьев рек Сура (ст. 9), Ветлуга (ст. 23) и в нижнем предплотинном участке близ пос. Шашкары (ст. 39) с глубинами 14, 11 и 20 м, соответственно. Колонки отбирались грунтовой трубкой ГОИН до маркирующего подстилающего первичного горизонта (руслового песка). Длина кернов на ст. 9, 23, 39 составляла 26, 40 и 27 см, соответственно. Число анализируемых слоев (толщиной около 1,0 см) приблизительно соответствовало возрасту водохранилища. Керны состояли из серого ила, и только в нижней части — из илистого песка или песчанистого ила. Средняя скорость осадконакопления на ст. 9 составила 8,7, ст. 23 — 13,3, ст. 39 — 9,0 мм/год.

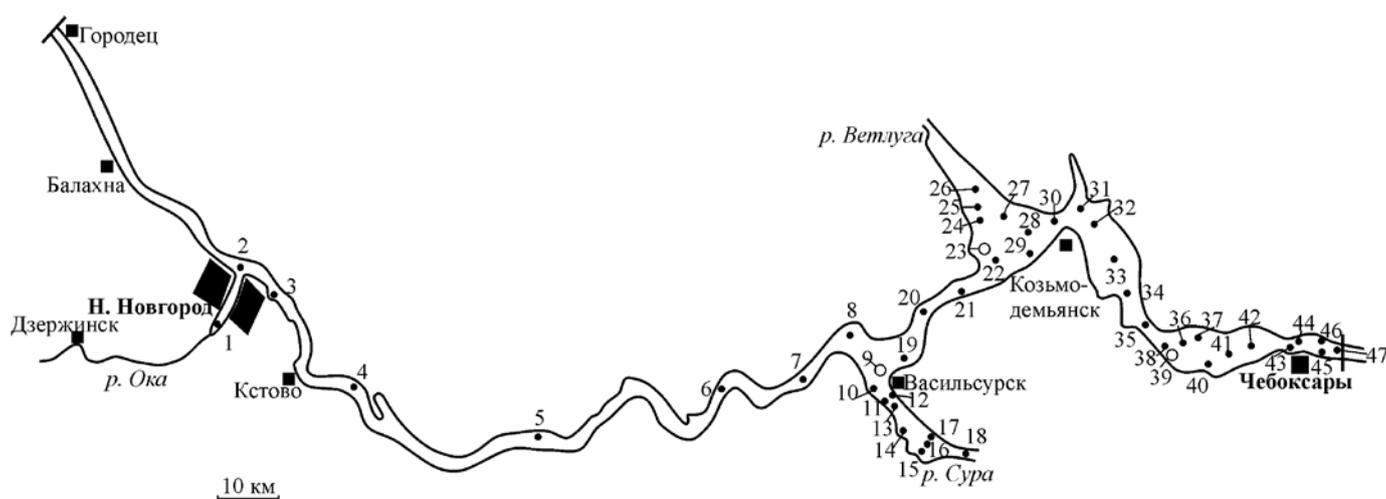


Рис. 1. Схема расположения станций в Чебоксарском водохранилище в 2010 г.

Таблица 1

Характеристики ДО Чебоксарского водохранилища в целом и в зонах повышенной аккумуляции

Показатель	В слое 0–5 см		В слоях кернов (2010 г.)		
	2001 г.*	2010 г.	Ст. 9	Ст. 23	Ст. 39
Число данных	28	44	31	39	29
ОВ, %	$\frac{0,1 - 14,2}{3,6 \pm 0,9}$ (136)	$\frac{0,2 - 15,8}{6,9 \pm 0,7}$ (66)	$\frac{1,1 - 14,2}{8,9 \pm 0,6}$ (35)	$\frac{2,4 - 10,7}{6,4 \pm 0,4}$ (36)	$\frac{5,3 - 15,4}{11,4 \pm 0,5}$ (25)
Влажность, %	$\frac{9,5 - 72,7}{33,3 \pm 4,2}$ (66)	$\frac{18,4 - 77,9}{47,5 \pm 2,7}$ (37)	$\frac{2,6 - 67,9}{56,2 \pm 2,1}$ (20)	$\frac{22,3 - 70,3}{48,2 \pm 2,3}$ (29)	$\frac{34,6 - 73,5}{63,0 \pm 2,1}$ (18)
Хл+Ф, мкг/г сухого грунта	$\frac{0,1 - 477,2}{56,9 \pm 24}$ (218)	$\frac{0,1 - 185,9}{47,2 \pm 6,6}$ (92)	$\frac{17,9 - 290,1}{175,4 \pm 13}$ (40)	$\frac{3,3 - 112,4}{40,1 \pm 4,9}$ (75)	$\frac{32,4 - 372,3}{152,7 \pm 13}$ (45)
Хл+Ф, мкг/(м ² мм)	$\frac{0,1 - 261,7}{30,5 \pm 13}$ (214)	$\frac{0,2 - 97,0}{27,2 \pm 3,1}$ (75)	$\frac{26,0 - 161,8}{96,3 \pm 6,0}$ (34)	$\frac{5,0 - 41,2}{24,1 \pm 1,5}$ (38)	$\frac{36,1 - 136,6}{66,5 \pm 3,9}$ (31)
Хл+Ф, мг/г ОВ	$\frac{0,02 - 4,79}{0,83 \pm 0,2}$ (136)	$\frac{0,06 - 2,67}{0,71 \pm 0,08}$ (73)	$\frac{1,16 - 2,92}{1,94 \pm 0,07}$ (21)	$\frac{0,14 - 1,11}{0,55 \pm 0,04}$ (46)	$\frac{0,56 - 3,11}{1,31 \pm 0,09}$ (36)
Ф, % от Хл+Ф	$\frac{55,4 - 100,0}{89,2 \pm 2,1}$ (12)	$\frac{67,9 - 100,0}{90,2 \pm 1,0}$ (8)	$\frac{89 - 96}{93 \pm 0}$ (2)	$\frac{81 - 100}{93 \pm 1}$ (4)	$\frac{76 - 100}{94 \pm 1}$ (6)

Примечание: здесь и в табл. 3–5 ОВ – органическое вещество, Хл – хлорофилл а, Ф – феопигменты; над чертой – пределы изменений, под чертой – среднее с ошибкой, в скобках – коэффициент вариации, %. * по [9].

Хлорофилл а, феопигменты, органическое вещество, естественную влажность и объемную массу ДО определяли по [9]. Продуктивность фитопланктона оценивали по концентрациям хлорофилла а в планктоне на основе данных эпизодических наблюдений в 1985, 1989–1991, 2001, 2005, 2008 гг. по [6, 10, 11]. Поскольку концентрации хлорофилла варьируют в широких пределах (от 0,6 до 497,0 мкг/л) и количество проб различается в разные годы, при осреднении данных учитывали разные характеристики выборки. Средняя концентрация хлорофилла 26,3 мкг/л получена с учетом данных за все годы (с 1985 по 2008 гг.), 20,3 мкг/л – с 1989 по 2008 гг., т.е., без учета 1985 г., характеризующегося необычно высокой про-

дуктивностью фитопланктона, 13,1 мкг/л – для тех лет, в которые пробы отбирались неоднократно (1989–1991 гг.). При оценке среднего содержания хлорофилла в столбе воды для всего водохранилища учитывали среднюю глубину 4,7 м, а на станциях отбора кернов – конкретную глубину.

Первичную продукцию в водохранилище за год (203,5 гС/(м²/год)) рассчитали из средней за сутки величины по [6] с учетом продолжительности безледного периода 212 сут. Первичную продукцию сравнивали с концентрацией органического углерода в условной биомассе водорослей ($C_{\text{усл}}$), соответствующей концентрации хлорофилла с феопигментами в среднегодовом слое



Таблица 2

Содержание растительных пигментов в ДО разного типа. Слой 0–5 см

Тип грунта	Хлорофилл+феопигменты				Органическое вещество, %	
	мкг/г сухого грунта		мг/(м ² ·мм)			
	2001	2010	2001	2010	2001	2010
Песок	1,0±0,5	2,3±1,2	1,8±0,9	3,6±1,9	0,3±0,0	0,5±0,1
Илистый песок	15,0±5,4	15,7±4,1	18,4±6,1	18,8±4,6	1,5±0,2	2,2±0,4
Песчанистый и глинистый илы	188,0±67,2	65,3±8,1	91,9±38,2	33,7±3,8	11,1±0,7	9,5±0,6

ДО для всего водохранилища (2,3 мм для 2001 г. и 1,7 мм для 2010 г.) и отдельных кернов (8,7–13,3 мм). При расчете $C_{\text{усл}}$ принимали, что удельное содержание хлорофилла в биомассе составляет 0,25 %, сухая биомасса – 10 % сырой, органический углерод – 50 % органического вещества.

Результаты и их обсуждение

Первые данные по содержанию хлорофилла и феопигментов в верхнем слое ДО Чебоксарского водохранилища (68,3±23,4 мкг/г сухого осадка), полученные в 2001 г., позволили охарактеризовать этот водоем как эвтрофный, что соответствует оценке трофии по хлорофиллу *a* фитопланктона [6]. В 2010 г. средняя концентрация хлорофилла с феопигментами (30,9±3,6 мкг/г сухого осадка), рассчитанная с учетом площадей разнотипных грунтов, уменьшилась и стала соответствовать величинам, характерным для мезотрофных водоемов [12]. Средневзвешенное (с учетом площадей разнотипных грунтов) удель-

ное содержание хлорофилла с феопигментами в органическом веществе (0,90±0,23 в 2001 г. и 0,73±0,13 мг/г ОВ в 2010 г.) также немного уменьшилось в последний год наблюдений. Неодинаковые темпы уменьшения концентрации пигментов в расчете на сухой грунт и органическое вещество в 2010 г. могут отражать изменения в соотношении концентраций автохтонного и аллохтонного органического вещества, а также соответствующие изменения в интенсивности деструкционных процессов. Показатели состояния растительных пигментов в ДО свидетельствовали о сильной деградации пигментного фонда в годы наблюдений (табл. 1). Сумма хлорофилла с феопигментами была представлена в основном дериватами.

Пространственную неоднородность отражают данные о содержании пигментов на станциях в верхнем слое ДО в конкретные годы. Неоднородность распределения растительных пигментов в ДО наглядно выявляется при группировке данных по типу грунта. Концентрация осадочных



Таблица 3

Сравнение содержания растительных пигментов в ДО и водной толще в расчете на единицу площади водохранилища

№ п/п	Станции	Слой грунта, см	Хл+Ф в ДО, мг/(м ² мм)	Хл в воде, мг/м ²			Хл в воде (Хл+Ф) в ДО		
				II	III	IV	II/I	III/I	IV/I
1	1– 28	0–5	35,9*	123,6	95,8	61,6	3,4	2,7	1,7
2	1– 44	0–5	21,4*	123,6	95,8	61,6	5,8	4,5	2,9
3	9	0–5	76,9	368,2	284,2	183,4	4,8	3,7	2,4
4	9	0–26	96,3	368,2	284,2	183,4	3,8	3,0	1,9
5	23	0–5	38,5	289,3	223,3	144,1	7,5	5,8	3,7
6	23	0–40	24,1	289,3	223,3	144,1	12,0	9,3	6,0
7	39	0–5	47,7	526,0	406,0	262,0	11,0	8,5	5,5
8	39	0–27	66,5	526,0	406,0	262,0	7,9	6,1	3,9

Примечание: 1 – 2001 г., 2–8 – 2010 г., * средневзвешенное содержание с учетом соотношения площадей ДО разного типа, II – 1985–2008 гг., III – 1989–2008 гг., IV – 1989–1991 гг.

пигментов и общего органического вещества увеличиваются в ряду ДО: песок, илистый песок, песчаный и глинистый илы (табл. 2). Согласно градации по содержанию осадочных пигментов [12], зоны дна в Чебоксарском водохранилище, занятые песком, относятся к олиготрофным участкам, илистым песком – мезотрофным, илами – эвтрофным или гипертрофным. Учитывая соотношение площадей [4], более половины общей площади дна занято олиготрофно-мезотрофными грунтами, около 30 % – эвтрофными и гипертрофными.

Связь между концентрациями пигментов в воде и ДО чаще всего оценивается по коэффициентам корреляции. Как правило, такие коэффициенты характеризуются невысокими величинами, поскольку продукционные и деструкционные процессы в воде и ДО разграничены в пространстве и различаются по временным масштабам – изменения процессов в водной толще об-

условлены преимущественно временными факторами, в ДО – пространственными [2]. В настоящей работе влияние фитопланктона на продукционные свойства ДО оценивали сравнением средних показателей продуктивности этого сообщества (концентрации хлорофилла *a* и первичной продукции) с содержанием пигментов в ДО для выборок, характеризующих пространственную и временную неоднородность распределения. Пространственную неоднородность отражают данные о содержании пигментов на станциях в верхнем слое ДО в конкретные годы, временную неоднородность – данные по вертикали кернов, а также в верхнем слое в разные годы (табл. 1). Вариабельность всех характеристик ДО и концентрации пигментов по вертикали кернов заметно меньше, чем по станциям в отдельные годы, что согласуется с представлениями о доминирующей роли пространственных факторов в изменчивости содержания пигментов в грунтах водохранилищ.

Таблица 4

Содержание растительных пигментов в ДО (в слое 1 мм на всей площади) и водной толще (во всем объеме воды) водохранилища

№ п/п	Хл+Ф в ДО, т	Хл в воде, т			Хл в воде (Хл+Ф) в ДО		
		II	III	IV	II/I	III/I	IV/I
1	35,3	136,8	105,6	68,1	3,9	3,0	1,9
2	21,8	136,8	105,6	68,1	6,3	4,8	3,1

Примечание: здесь и в табл. 5 обозначения, как в табл. 3.

№ п/п	Хл+Ф,* мг/(м ² год)	С _{усл} , г/(м ² год)	С _{усл} , % ПП
1	82,6	1,7	0,81
2	36,9	0,7	0,36
3	666,5	13,3	6,6
4	834,6	16,7	8,2
5	513,3	10,7	5,0
6	321,3	6,4	3,2
7	429,3	8,6	4,2
8	598,5	12,0	5,9

Таблица 5
Оценка соотношения между первичной продукцией фитопланктона и условной биомассой водорослей в ДО водохранилища

Вертикальное распределение растительных пигментов в колонках ДО можно рассматривать как многолетнюю динамику продуктивности. На примере трех станций в зонах повышенной аккумуляции установлено, что временная динамика концентрации пигментов, как и пространственная, характеризуется величинами, относящимися к участкам разного трофического типа — от олиготрофного до гипертрофного, но средние для отдельных кернов величины относятся к мезотрофным и гипертрофным, что соответствует характеристикам глинистого ила, преобладающего в колонках.

Влияние фитопланктона на продукционные свойства ДО оценивали на основе сравнения концентраций растительных пигментов в воде и ДО.

Средняя концентрация пигментов в водном столбе, как правило, превышает содержание пигментов в расчете на толщину слоя 1 мм и единицу площади. Соотношение между концентрациями пигментов в воде и грунтах изменяется на участках с песком от 17 до 69, на участках с илистым песком — от 3 до 7, в местах залегания илов — от 1 до 4, т.е. роль фитопланктона в формировании продукционных свойств песчаных отложений существенно меньше, чем илов. Среднее для всех станций отношение концентраций пигментов в водном столбе и поверхностном

слое ДО составляет 1,7–5,8, для кернов — 1,9–12 (табл. 3). Содержание пигментов в целом объеме воды водохранилища превышает концентрацию пигментов в слое 1 мм всей площади в 1,9–6,3 раза (табл. 4). Экологический смысл этих величин состоит в том, что их значения сопоставимы со средней скоростью осадконакопления, как и в других исследованных волжских водохранилищах [2, 3].

Особый интерес представляет оценка соотношения между концентрацией пигментов в грунтах и первичной продукцией фитопланктона, создающей энергетическую базу функционирования экосистемы. Условная биомасса водорослей в верхнем слое ДО, соответствующая концентрации хлорофилла с феопигментами в среднегодовом слое, составляет для кернов 3,2–8,2 % первичной продукции, для всех станций — 0,4–0,8 % (табл. 5). Незначительная доля условной биомассы от первичной продукции, отражающая низкий коэффициент fossilization хлорофилла, свидетельствует об эффективном использовании в трофической цепи новообразованного при фотосинтезе органического вещества. Только в зонах интенсивной аккумуляции взвеси относительный вклад условной биомассы увеличивается на порядок.

Содержание хлорофилла с феопигментами в слое ДО, равном средней для водохранилища толщине, составляет 1,6 и 1,1 г/м² в 2001 и 2010 гг., а в зонах илонакопления за весь период существования водохранилища достигает 9,6–25 г/м². Эти концентрации существенно превышают среднее содержание хлорофилла в водной толще (табл. 3).

Заключение

Выполнена оценка соотношения между концентрациями растительных пигментов в ДО и показателями продуктивности водорослей — концентрацией хлорофилла *a* в воде и первичной продукцией фитопланктона. Установлено, что влияние фитопланктона на продукционные свойства донного яруса водохранилища, занятого преимущественно песчаными наносами, невелико, и только в зонах илонакопления оно усиливается. Условная биомасса водорослей в среднегодовом слое ДО составляет в среднем 0,4–0,8 % первичной продукции фитопланктона, но содержание хлорофилла *a* с дериватами в целом для всей толщины

грунтов существенно выше, чем в столбе воды. Апробированные способы оценки соотношения между продуктивностью пелагиали и бентали могут быть использованы в экологическом мониторинге водохранилищ. Поскольку наличие пигментов (и органического вещества) в ДО, изолированных от метаболически активного слоя, характеризует незамкнутость круговорота органического вещества, изучение пигментного фонда может иметь значение для оценки устойчивости экосистемы.

Литература

1. Reuss N. Development and application of sedimentary pigments for assessing effects of climatic and environmental changes on subarctic lakes in northern Sweden. / N. Reuss, P.R. Leavitt, R.I. Hall, C. Bigler, D. Hammarlund // *J. Paleolimnol.* 2010. V. 43. P. 149–169.
2. Сигарева Л.Е. Содержание хлорофилла в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища // *Биол. внутр. вод.* 2010. № 3. С. 38–46.
3. Сигарева Л.Е. Оценка роли фитопланктона в формировании продуктивности донных отложений в Горьковском водохранилище по растительным пигментам / Л.Е. Сигарева, Н.А. Тимофеева // *Водоросли: таксономия, экология, использование в мониторинге.* Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 207–212.
4. Касьянова В.В. Трансформация грунтового комплекса Чебоксарского водохранилища (мониторинг донных отложений) / В.В. Касьянова, В.В. Законнов // *Материалы конф. «Экология. Экономика. Информатика».* Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2011. С. 175–180.

Ключевые слова:
хлорофилл, вода, донные отложения, водохранилище

5. Папченков В.Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: ЦМП МУБиНТ, 2001. 200 с.
6. Минеева Н.М. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус, 2009. 279 с.
7. Охупкин А.Г. Фитопланктон Чебоксарского водохранилища. Тольятти: ИЭВБ РАН, 1994. 275 с.
8. Баканов А.И. Бентос Чебоксарского водохранилища: таксономический состав и обилие // *Биол. внутр. вод.* 2005. № 1. С. 69–78.
9. Сигарева Л.Е. Особенности распределения растительных пигментов в донных отложениях Чебоксарского водохранилища / Л.Е. Сигарева, Н.А. Тимофеева, В.В. Законнов // *Гидробиол. журн.* 2004. Т. 40, № 5. С.27–35.
10. Минеева Н.М. Пигменты фитопланктона как показатели экологического состояния Чебоксарского водохранилища / Н.М. Минеева, Н.Н. Абрамова // *Вод. ресурсы.* 2009. Т. 36. № 5. С. 588–596.
11. Сигарева Л.Е. Формирование продуктивности донных отложений в водохранилищах Волги / Л.Е. Сигарева, В.И. Номоконова, В.Н. Паутова, Н.М. Минеева, Н.А. Тимофеева, О.С. Макарова // *Труды Междунар. научно-практич. конф. «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов».* Пермь: Перм. гос. ун-т, 2009. С. 385–390.
12. Möller W.A.A. The content of chlorophyll in the sediment of the volcanic maar lakes in the Eifel region (Germany) as an indicator for eutrophication / W.A.A. Möller, B.W. Scharf // *Hydrobiologia.* 1986. V. 143. P. 327–329.

L.E. Sigareva, N.A. Timofeeva, V.V. Zakonnov

ESTIMATION OF PHYTOPLANKTON INFLUENCE ON PRODUCTIONAL PROPERTIES OF BOTTOM SEDIMENTS OF CHEBOKSARSKOE RESERVOIR USING PLANT PIGMENTS

Phytoplankton influence on bottom sediments was estimated using concentration ratio of plant pigments in sediments with primary production and concentration of chlorophyll *a* in water. It was revealed that phytoplankton effects on productional properties in sludging zones in a greater degree than in sand deposits. The algal biomass in sediment layer in the reservoir (calculated from the pigments for a year) is 0.4–0.8% of primary production of phytoplankton..

Key words: chlorophyll, water, bottom sediments, reservoir.