

УДК 556.555.6:581.132

**Л.Е. СИГАРЕВА, Н.А. ТИМОФЕЕВА**

Ин-т биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,  
Некоузский р-н, пос. Борок, 152742 Ярославская обл., Россия  
e-mail: [sigareva@ibiw.yaroslavl.ru](mailto:sigareva@ibiw.yaroslavl.ru), [timof@ibiw.yaroslavl.ru](mailto:timof@ibiw.yaroslavl.ru)

## **МЕЖГОДОВАЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА *a* В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (РОССИЯ)**

Изучено содержание растительных пигментов в верхних слоях разнотипных отложений с 1993 по 2009 гг. в Рыбинском водохранилище и проведено сравнение с показателями продуктивности фитопланктона. Отмечено уменьшение содержания осадочного хлорофилла (хлорофилл *a* с феопигментами) на русловых станциях. Средняя концентрация за безледный период на станциях изменялась в диапазоне значений (3–284 мкг/г сухого осадка в слое 0–2,5 см и 1,8–260,7 – в слое 0–5 см), характерных для всех типов трофии водоемов. Средняя за все годы наблюдений концентрация была максимальной (176,4 мкг/г сухого осадка) в отложениях экотонного участка и минимальной (30,4) – в озеровидном плесе с мозаичными грунтами. Результаты исследований свидетельствуют об уменьшении темпов эвтрофирования водохранилища.

**Ключевые слова:** хлорофилл *a*, донные отложения, межгодовая динамика, Рыбинское водохранилище.

### **Введение**

Организация регулярных наблюдений в различных регионах за состоянием альгоценозов обусловлена несовпадением временных изменений в различных климатических зонах и при разном уровне антропогенного влияния (например, оз. Красное и Рыбинское вдхр. на Северо-Западе России, Киевское, Кременчугское и Каховское вдхр. в Украине) (Экологические ..., 2001; Трифонова и др., 2003; Пырина и др., 2006; Лишук, 2007). Сведений, полученных при непрерывных наблюдениях, крайне мало и относятся они преимущественно к планктонным организмам. При изучении основного показателя эвтрофирования – первичной продукции – используются данные о содержании хлорофилла фитопланктона (ОЕСД, 1982; Девяткин и др., 2001; Пырина, Сигарева, 2005; Пырина и др., 2006; и др.). Донные отложения считаются лучшими показателями эвтрофирования, поскольку являются источниками внутренней биогенной нагрузки, в значительной мере обуславливающей продуктивность водоема (Россолимо, 1977; Даценко, 2007).

© Л.Е. Сигарева, Н.А. Тимофеева, 2011

Фундаментальные основы использования осадочных пигментов в мониторинге экологического состояния водоемов разработаны недостаточно, несмотря на повсеместные исследования (Сигарева, Тимофеева, 2004, 2005; Тимофеева, Сигарева, 2004; Сигарева, 2008; Swain, 1985; Adams, Prentki, 1986; Leavitt, 1993).

К числу водоемов России, на которых проводятся многолетние исследования структуры и функционирования сообществ гидробионтов, относится Рыбинское вдхр. (площадь 4550 км<sup>2</sup>, объем 25,4 км<sup>3</sup>) – одно из крупнейших в волжском каскаде. Наиболее длинный ряд наблюдений получен для концентрации хлорофилла фитопланктона, что позволило выявить межгодовые флуктуации и признаки уменьшения первичной продукции на рубеже прошлого и нынешнего веков (Экологические ..., 2001; Пырина, Сигарева, 2005). Установлено, что в водохранилище происходит увеличение площади песчаных грунтов и уменьшение – илов (Законнов, 1995, 2002). Для выяснения характера взаимосвязи между показателями продуктивности фитопланктона и бентосных биотопов необходимо сравнить продукционные характеристики водного и донного ярусов экосистемы.

Цель работы – исследование временной изменчивости продуктивности дна Рыбинского вдхр. на основе данных о межгодовой динамике содержания осадочного хлорофилла в донных отложениях.

## Материалы и методы

Пробы собраны в безледный период 1993, 1997, 1998, 2001, 2008, 2009 гг. на Рыбинском вдхр. Пробы донных отложений отбирали стратометром на постоянных глубоководных станциях речного Волжского (ст. 1 – Коприно, ст. 2 – Молога) и озеровидного Главного плесов (ст. 3, 4, 5, 6 – Наволок, Измайлово, Средний Двор, Брейтово соответственно). Анализировали верхние слои отложений толщиной 2,5 и (или) 5 см. Данные для слоя 0–2,5 см в 1993 и 2008 гг. рассчитывали по уравнениям, полученным в 2009 г. Концентрацию осадочного хлорофилла (хлорофилл *a* с продуктом его деградации – феофитином и феофорбидом) определяли спектрофотометрическим методом в ацетоновом экстракте. Концентрацию феопигментов рассчитывали по уравнениям для феофитина (Lorenzen, 1967). Влажность определяли при высушивании (60 °С) образцов грунта. Воздушно-сухую объемную массу грунта рассчитывали по способу, предложенному ранее (Сигарева, Тимофеева, 2004). Соотношение каротиноиды/хлорофилл оценивали, исходя из оптических плотностей на длинах волн 480 и 665 нм после вычитания поправки на длине волны 750 нм.

Связь между концентрациями пигментов в верхних слоях отложений (0–2,5 и 0–5 см) характеризовалась достаточно высокими коэффициентами детерминации как для постоянных станций регулярных наблюдений ( $R^2 = 0,89$ ), так и для дополнительных профундальных станций эпизодических наблюдений ( $R^2 = 0,96$ ), поэтому для пересчета использовали единое уравнение регрессии (рис. 1).

## Результаты и обсуждение

Глубина водной толщи на станциях речного Волжского плеса составляла 10–14 м, на станциях озеровидного Главного – 4,5–16 м. Межгодовых изменений глубины не обнаружено (табл. 1).

Прозрачность и температура воды в последние годы наблюдений стали несколько выше, чем в 1993 г. (см. табл. 1). Площадь донных отложений на глубине 4,5–16 м в сумме составляет 59 % общей площади водохранилища, средняя скорость седиментации на участках с такими глубинами варьирует от 1,6 до 14 мм/год (Законнов, 2002).

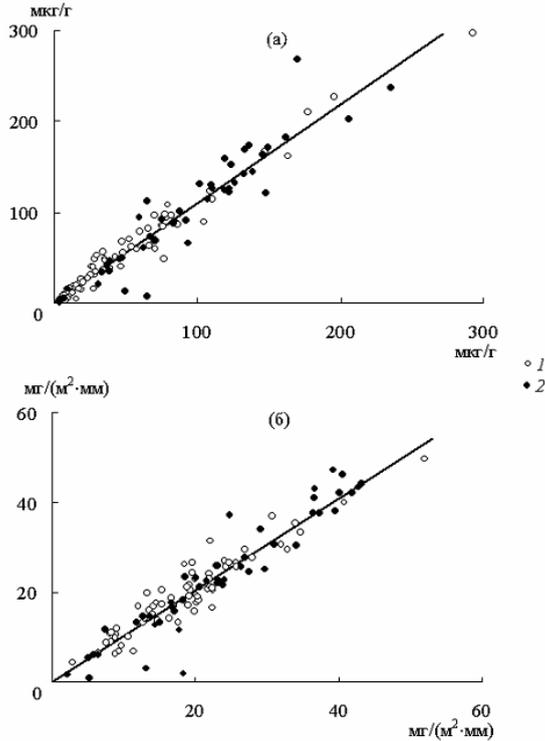


Рис. 1. Взаимосвязь между концентрациями пигментов в слоях донных отложений разной толщины в Рыбинском вдхр. По оси ординат: концентрация хлорофилла *a* с феофитином в слое 0–2,5 см; по оси абсцисс: то же в слое 0–5 см; 1 – данные для постоянных станций, 2 – для дополнительных. Концентрации, рассчитанные на сухой осадок (а) и сырой слой (б). Уравнения регрессии:  $y = 1,08x + 1,07$ ,  $n = 116$ ,  $R^2 = 0,93$  (а);  $y = 1,02x + 0,21$ ,  $n = 116$ ,  $R^2 = 0,89$  (б)

Общее количество хлорофилла в донных отложениях Рыбинского водохранилища во все годы представлено преимущественно продуктами разрушения (около 80 %). В течение безледного периода концентрация хлорофилла *a* с феофитином (хл. +ф) существенно варьировала, причем на станциях речного Волжского плеса меньше, чем на станциях озеровидного Главного плеса. Кроме того, концентрации, рассчитанные на сухой осадок, варьировали сильнее, чем таковые в сыром слое (табл. 2).

Таблица 1

## Средние значения некоторых характеристик абиотических условий на станциях Рыбинского вдхр. в разные годы

Станция	Год	Глубина водной толщи, м	Прозрачность воды, м	Температура поверхности воды, °С	Влажность отложений, %	Преобладающий тип отложений
Коприно	1993	12,3 ± 0,4	1,3 ± 0,0	13,3 ± 2,1	79 ± 0,7 (2)	Песчаный ил
– “ –	2008	11,9 ± 0,4	1,7 ± 0,1	15,6 ± 1,9	71,3 ± 1,6 (6)	Глинистый и песчаный илы
– “ –	2009	11,7 ± 0,2	1,5 ± 0,14	17,3 ± 1,4	73,5 ± 1,3 (5)	– “ –
Молога	1993	13,1 ± 0,6	1,1 ± 0,1	12,8 ± 2,2	75 ± 1(4)	Песчаный ил
– “ –	2008	13,5 ± 0,2	1,7 ± 0,1	16,5 ± 1,6	73 ± 1,7 (5)	Глинистый и песчаный илы
– “ –	2009	13,1 ± 0,6	1,6 ± 0,2	16,9 ± 1,6	73,5 ± 0,7 (3)	– “ –
Наволоч	1993	9,1 ± 0,5	1,3 ± 0,1	13,2 ± 2,2	53 ± 9 (44)	Илистый песок и песчаный ил
– “ –	2008	6,3 ± 0,4	1,3 ± 0,2	17,7 ± 1,8	32,4 ± 1,2 (5)	Илистый песок
– “ –	2009	7,1 ± 0,4	1,25 ± 0,08	16 ± 1,8	59,8 ± 6,9 (30)	Торфогенный и илистый песок
Измайлово	1993	7,2 ± 0,1	1,1 ± 0,1	12,5 ± 2,2	54 ± 8 (40)	Илистый песок с частицами торфа
– “ –	2008	6,8 ± 0,5	1,54 ± 0,17	14 ± 2,2	68,8 ± 10,7 (31)	Илистый песок и песчаный ил
– “ –	2009	6,3 ± 0,4	1,21 ± 0,1	17,0 ± 1,9	46,8 ± 11,1 (63)	Песок, песчаный и торфогенный ил
Средний Двор	1993	10,0 ± 0,8	1,2 ± 0,1	11,7 ± 2,4	80 ± 8 (25)	Песчаный ил
– “ –	2008	9,2 ± 0,3	1,52 ± 0,14	14,6 ± 2,1	71,7 ± 9,3 (29)	Илистый песок и торфогенный ил
– “ –	2009	10,4 ± 0,4	1,24 ± 0,08	16,9 ± 1,6	84,8 ± 1,6 (5)	Торфогенный ил
Брейтово	1993	10,7 ± 1,0	1,2 ± 0,1	14,1 ± 1,8	58 ± 6 (30)	Песчаный ил
– “ –	2008	12,9 ± 0,6	1,4 ± 0,12	15,2 ± 2,1	73,9 ± 2,7 (9)	– “ –
– “ –	2009	12 ± 0,5	1,2 ± 0,06	16,9 ± 1,7	71,6 ± 4,4 (17)	Песчаный и глинистый илы

Примечание. В скобках приведен коэффициент вариации среднего значения, %.

Таблица 2

Средняя концентрация хлорофилла *a* с феопигментами в донных отложениях на станциях Рыбинского вдхр. в разные годы

Период наблю- дения	Коприно		Молога		Наволоч		Измайлово		Средний Двор		Брейтово	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
1993/ VI-X	<u>179,9 ± 11,6</u> 41,3±3,9	<u>17</u> 23	<u>254,5 ± 25,6</u> 66,9±5,1	<u>27</u> 19	<u>49,4 ± 27,4</u> 14±3,9	<u>147</u> 69	<u>30 ± 15,8</u> 10,6±3,5	<u>139</u> 80	<u>283,9 ± 54,3</u> 37,5±5,1	<u>47</u> 30	<u>92 ± 13,8</u> 41±4,2	<u>40</u> 25
1997/ VI-IX	<u>99,6 ± 15,3</u> 30,1±2,5	<u>31</u> 17	<u>247,2 ± 27,5</u> 74,2 ±9,3	<u>19</u> 22	<u>76,4 ± 87,9</u> 18,9±15,7	<u>163</u> 117	<u>3,2</u> 3,1	-	<u>109,2 ± 26,7</u> 37,7±7,3	<u>24</u> 19	<u>129,0 ± 41,1</u> 46,8±12,6	<u>45</u> 38
1998/ V-X	<u>108,4 ± 21</u> 32,9 ±5,3	<u>34</u> 28	<u>106,7 ± 1,7</u> 37,8±6,2	<u>2</u> 17	<u>93,1 ± 50,3</u> 24,3±11,2	<u>54</u> 46	<u>69,1 ± 9,1</u> 20,9±16,1	<u>13</u> 77	<u>87,5 ± 90,7</u> 20,4±13,6	<u>10</u> 4 67	<u>115,9 ± 26,7</u> 44,4±3,5	<u>33</u> 11
2008/ V-X	<u>82,0 ± 21,8</u> 25,8 ±5,5	<u>65</u> 53	<u>134,6 ± 25,3</u> 38,5± 5,4	<u>42</u> 32	<u>3,0 ± 0,7</u> 2,3±0,8	<u>35</u> 48	<u>35,8 ± 15,7</u> 8,4±3,5	<u>88</u> 84	<u>121,6 ± 44,2</u> 20,9±5,3	<u>81</u> 57	<u>129,7 ± 20</u> 34,7±3	<u>38</u> 21
2009/ VI-X	<u>81,3 ± 8,9</u> 22,8± 1,4	<u>31</u> 18	<u>138,8 ± 9,3</u> 40,8 ±1,7	<u>19</u> 12	<u>49,1 ± 9,3</u> 14±2,6	<u>99</u> 50	<u>13,7 ± 5,8</u> 6,2±3,1	<u>113</u> 135	<u>161,1 ± 23,7</u> 22,3±3,1	<u>42</u> 40	<u>82,8 ± 23,1</u> 23±5,9	<u>79</u> 72
1993- 2009*	<u>110,5 ± 9,1</u> 30±1,9	<u>47</u> 36	<u>192,5 ± 14,1</u> 54,9± 3,7	<u>41</u> 37	<u>57,1 ± 14,7</u> 14,5±2,3	<u>126</u> 76	<u>27,9 ± 6,7</u> 9,2±1,9	<u>116</u> 98	<u>174,3 ± 22</u> 26,7±2,4	<u>64</u> 45	<u>104,4 ± 9,4</u> 34,9±2,7	<u>49</u> 41
1993- 2009**	<u>110,2 ± 18,2</u> 30,8±3,2	-	<u>176,4 ± 35,3</u> 57,7 ±10	-	<u>54,2 ± 15,3</u> 16,3±5	-	<u>30,4 ± 12,3</u> 9,8±4,6	-	<u>152,7 ± 34,9</u> 27,6±4,6	-	<u>109,9 ± 9,6</u> 37,7±4,6	-

П р и м е ч а н и е . Над чертой – мкг/г сухого осадка, под чертой – мг/(м<sup>2</sup>мм); I – среднее с ошибкой, II – коэффициент вариации, %; прочерк – отсутствие данных, \* – ср. арифм. из всех данных для станции, \*\* – ср. арифм. из средних по годам. Слой грунта 0-2,5 см. Данные для 1993 и 2008 г. рассчитаны исходя из концентраций в слое 0-5 см по уравнениям на рис. 1.

Среднее для всего периода наблюдений содержание хлорофилла *a* с феофитином в поверхностном слое (0–2,5 см) на станциях Волжского плеса характеризовалось более высокими величинами, чем на станциях Главного плеса. В многолетнем аспекте концентрация осадочных пигментов на отдельных участках изменялась по-разному (рис. 2, см. табл. 2).

Концентрация осадочного хлорофилла в 2009 г. повсеместно характеризовалась более низкими значениями, чем в 1993 г. (см. табл. 2). Четкое уменьшение содержания растительных пигментов в отложениях водохранилища выявлено по данным регулярных наблюдений в 1993, 2008 и 2009 гг. для верхнего слоя 5 см (табл. 3).

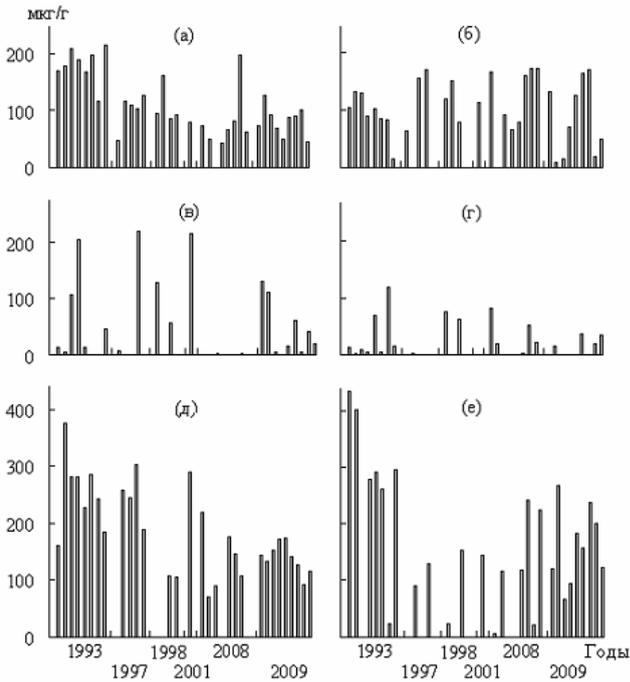


Рис. 2. Содержание растительных пигментов (мкг/г) в верхнем (0–2,5 см) слое донных отложений Рыбинского вдхр. в разные периоды наблюдений; а, б, в, г, д, е – станции Коприно, Брейтово, Наволок, Измайлово, Молога, Средний Двор соответственно. Месяцы наблюдений: в 1993 г. – VI–X, 1997 – VI–IX, 1998 – V–X, 2001 – VI, 2008 – V–X, 2009 – VI–X

Один из показателей состояния пигментного фонда, который широко используется для оценки физиологического состояния растительных сообществ, – соотношение между концентрациями желтых и зеленых пигментов, в частности индекс  $E_{480}/E_{665}$ . По нашим данным, величины индекса превышают таковые для функционирующего фитопланктона. Внесение поправки на присутствие дериватов хлорофилла лишь частично приводит к уменьшению показателя соотношения концентраций желтых и зеленых пигментов, выраженного индексом  $E_{480}/(1,7E_{665к})$ ,

Таблица 3

## Содержание растительных пигментов в донных отложениях на станциях Рыбинского вдхр. в разные годы

Показатель	Год	Коприно		Молога		Наволоч		Измайлово		Средний Двор		Брейтово	
		I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
хл.+ф, мкг/г с.о	1993	164,9±10,7	17	233,7±23,6	27	44,6±25,2	150	26,7±14,5	144	260,7±50,1	47	83,9±12,7	40
– “ –	2008	74,6±20,1	66	123,1±23,3	42	1,8±0,7	55	32±14,5	90	111,1±40,8	82	118,6±18,4	38
– “ –	2009	75,4±8,5	32	124,2±6,3	14	39,5±14,1	94	15,6±6,2	106	146,2±19,3	37	83,1±15,5	53
хл.+ф, мг/ (М <sup>2</sup> ·мм)	1993	53,8±5,2	25	78,9±7,5	25	15,8±3,6	56	8,8±2	60	42,6±5,8	36	43,4±5,3	32
– “ –	2008	25±5,4	53	37,5±5,3	32	2,1±0,8	53	8±3,5	86	20,3±5,2	57	33,8±2,9	21
– “ –	2009	23,1±1,7	21	39,2±1,2	8	13,6±3	59	6,7±3	120	22,7±1,9	24	25,7±4,4	49
$E_{480}/E_{665}$	1993	2,24±0,07	8	1,9±0,11	16	2,18±0,3	30	4,62±1,65	9	2,42±0,18	18	2,08±0,09	12
– “ –	2008	2,85±0,17	15	2,42±0,12	11	1,45±0,02	2	4,26±0,99	47	3,17±0,26	18	2,57±0,16	15
– “ –	2009	3,10±0,2	18	2,88±,12	12	3±0,35	31	4,53±1,64	96	3,74±0,4	31	3,21±0,47	41
$E_{480}/(1,7E_{665к})$	1993	1,51±,04	7	1,4±0,07	13	1,42±0,18	28	2,85±0,91	84	1,58±0,10	15	1,37±0,04	7
– “ –	2008	1,81±0,11	14	1,69±0,08	11	1,02±0,12	17	2,51±0,46	36	2,05±0,15	17	1,79±0,14	19
– “ –	2009	1,93±0,11	16	1,96±0,07	10	1,92±0,23	31	2,96±1,12	100	2,43±0,28	32	2,16±0,33	43

Примечание.  $E_{480}/E_{665}$  и  $E_{480}/(1,7E_{665к})$  – соотношение между оптическими плотностями в области поглощения каротиноидов и хлорофилла *a* без учета вклада феопигментов (первый) и с их учетом (второй). Остальные обозначения, как в табл. 1. Слой 0-5 см

но и он не достигает величин, характерных для фитопланктона. На фоне уменьшения содержания осадочного хлорофилла величины индекса повсеместно возросли по сравнению с таковыми в 1993 г. (см. табл. 3), т.е. современные условия способствуют более быстрой деградации зеленых пигментов.

Для оценки направленности процесса эвтрофирования выявляли связь концентрации пигментов в донных отложениях с продукционными характеристиками фитопланктона — основного источника первичной продукции в крупных водоемах. Продуктивность фитопланктона Рыбинского вдхр., оцененная по средним за год концентрациям хлорофилла *a* в фотическом слое (0–2 м), возрастала с 1969 г. по 1995 г.; средние за 10 лет концентрации хлорофилла *a* в планктоне Волжского плеса увеличивались от 11,2 (1974–1983 гг.) до 13,9 мкг/л (1984–1993 гг.), в планктоне Главного — от 10,2 до 13,6 мкг/л соответственно (Экологические ..., 2001). В 1997 и 1998 гг. концентрация планктонного хлорофилла *a* существенно уменьшилась по сравнению с предшествующим периодом и в 2004 г. составила в Волжском плесе 6,3, в Главном — 9,7 мкг/л. Для сравнения: в 1993 г. концентрация хлорофилла *a* составляла 14,3 и 16 мкг/л соответственно, в Волжском и Главном плесах (Экологические ..., 2001; Пырина, Сигарева, 2005). Ключевой показатель эвтрофирования — скорость первичной продукции, рассчитанная по содержанию хлорофилла фитопланктона, тоже возрастала с 1969 по 1995 г. с периодическими уменьшениями, согласно природной цикличности такого глобального и главного для фотосинтеза фактора, как солнечная радиация (Пырина, и др., 2006). Относительно низкая продуктивность фитопланктона в 2008 и 2009 гг. согласуется с величинами прозрачности воды, которая (см. табл. 1) соответствует таковым в период (1969–1971 гг.) с наименее низкой концентрацией хлорофилла водорослей (Пырина и др., 2006).

Анализ других показателей продуктивности альгоценозов Рыбинского вдхр. показал наличие таких же трендов, что и для хлорофилла *a* фитопланктона. Так, среднее значение интенсивности фотосинтеза (в области светового насыщения) литорального фитопланктона, по результатам еженедельных измерений, в 1993 г. составило  $2,82 \pm 0,41$ , в 1997 —  $1,66 \pm 0,13$  мгО<sub>2</sub>/(л сут) (Девяткин и др., 2001). Средняя биомасса фитопланктона на постоянных глубоководных станциях в 1989 г. была 2,39, в 1997–2008 —  $1,3 \pm 0,7$ , в 2008 г. 0,6–0,8 мг/л (Митропольская, 2010).

Тенденции в изменчивости продукционных свойств водного и донного ярусов сходны. Как было отмечено выше, среднее содержание осадочного хлорофилла в 1993 г. заметно выше, чем в 2009 г., но изменения показателя на различных участках неодинаковы (см. табл. 2 и 3). Более заметны изменения в речном плесе. Это подтверждается данными не только для отдельных станций, но и для плесов: в начале наблюдений (1993 г.) концентрация пигментов в сухом осадке в Волжском плесе превышала таковую в Главном плесе в 2,3, а в конце (2009 г.) — только

в 1,5 раза. Концентрация пигментов в самом Волжском плесе со временем тоже уменьшилась сильнее (в 2 раза), чем в Главном (в 1,3 раза).

Одна из причин более высокого содержания пигментов в донных отложениях на исследуемых станциях Волжского плеса – увеличенные глубины по сравнению с Главным плесом. Коэффициент корреляции между глубиной и концентрацией осадочного хлорофилла при расчете на сухой грунт 0,41 – 0,67, при расчете на сырой осадок 0,64 – 0,80 ( $n = 34$  и  $52$ ,  $P < 0,05$ ). При этом повышенная вариабельность концентраций пигментов (до 150 %) отмечалась на центральных станциях Главного плеса, что, по-видимому, обусловлено интенсивной циркуляцией водной массы, взмучиванием поверхностного слоя отложений и их размыванием.

Особенности распределения концентрации пигментов в связи с типом грунта изучали в многолетнем плане. Во все годы характер зависимости между содержанием осадочного хлорофилла и типологическим свойством отложений – влажностью – был одинаков, но уравнение регрессии для 1993 г. отличается более высокими коэффициентами по сравнению с таковыми для 2008 и 2009 гг. (рис. 3).

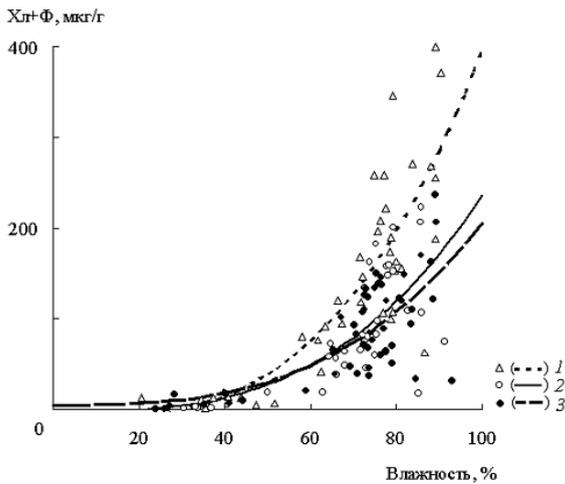


Рис. 3. Взаимосвязь концентрации растительных пигментов (мкг/г) с влажностью отложений в Рыбинском вдхр. в разные годы: 1 – 1993, 2 – 2008, 3 – 2009 гг. Уравнения регрессии:  $y = 4,08 \cdot 10^{-4}x^3 - 12,61$ ,  $n = 41$ ,  $R^2 = 0,70$  (1);  $y = 2,38 \cdot 10^{-4}x^3 - 2,27$ ,  $n = 34$ ,  $R^2 = 0,48$  (2);  $y = 2,00 \cdot 10^{-4}x^3 + 5,12$ ,  $n = 52$ ,  $R^2 = 0,51$  (3)

Для оценки количественной связи между содержанием пигментов в воде и отложениях рассчитывали отношение концентрации хлорофилла в сумме с феопигментами в 1-миллиметровом слое отложений и во всем столбе воды. В 1993 г. концентрация хлорофилла в воде превышала содержание осадочного хлорофилла в 1-миллиметровом слое в 3–9 раз (в среднем – 5,3 раза), в 2009 г. – в 2–11 раз (в среднем тоже 5,3 раза). Совпадение средних значений исследуемого отношения при изменении

сравниваемых исходных концентраций может свидетельствовать о том, что в годы с разной продуктивностью относительная роль фитопланктона в формировании продукционных свойств донных отложений в целом достаточно сходная, что, вероятно, обусловлено действием какого-то глобального фактора, например, сил гравитации, и не зависит от продуктивности. Действительно, на озерах Северо-Запада России ранее было показано, что скорость оседания взвешенных веществ не зависит от трофии водоема (Умнова, 1999).

Концентрация хлорофилла (с дериватами) в расчете на углерод водорослей в среднегодовом слое донных отложений на отдельных станциях варьирует от 0,2 до 22,7 % и в среднем составляет 6,6 % величины первичной продукции фитопланктона (по данным 1993 г., согласно результатам работы (Пырина и др., 2006). Значения анализируемого соотношения оказались выше полученных ранее (не более 1 %) для водоема в целом при учете площадей грунтов разного типа (Сигарева, Тимофеева, 2005). Понижение соотношения обусловлено тем, что большая часть дна водохранилища занята песчаными отложениями и находится в условиях, неблагоприятных для аккумуляции и сохранения растительных пигментов в составе органического вещества.

## Выводы

Межгодовая динамика содержания осадочного хлорофилла в крупном неглубоком водохранилище зависит от продуктивности фитопланктона и структуры грунтового комплекса. В разные годы относительный вклад фитопланктона в формирование осадочного фонда растительных пигментов фактически не изменяется. Уменьшение концентрации пигментов в донных отложениях свидетельствует о замедлении темпов эвтрофирования Рыбинского водохранилища.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-04-00384).*

Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. – М.: ГЕОС, 2007. – 252 с.

Девяткин В.Г., Метелева Н.Ю., Митропольская И.В. Гидрофизические факторы продуктивности литорального фитопланктона: оценка и прогноз содержания хлорофилла *a* и интенсивности фотосинтеза // Биол. внутр. вод. – 2001. – № 1. – С. 36–45.

Законнов В.В. Пространственно-временная неоднородность распределения и накопления донных отложений верхневолжских водохранилищ // Вод. рес. – 1995. – 22, № 3. – С. 362–371.

Законнов В.В. Пространственно-временная трансформация грунтов Рыбинского водохранилища // Актуальные проблемы экологии Ярославской обл. Вып. 2. – Ярославль, 2002. – С. 186–190.

Лицук А.В. Эколого-физиологические основы формирования фитопланктона пресноводных экосистем: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. – Киев, 2007. – 38 с.

- Митропольская И.В. Структура и динамика фитопланктона Рыбинского водохранилища: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Москва, 2010. — 27 с.
- Пырина И.Л., Сигарева Л.Е. Содержание пигментов фитопланктона как показатель современного состояния Рыбинского водохранилища // Актуальные проблемы экологии Ярославской обл. Вып. 3. Т. 1: Мат. конф. — Ярославль, 2005. — С. 270–274.
- Пырина И.Л., Литвинов А.С., Кучай Л.А., Роцупко В.Ф., Соколова Е.Н. Многолетние изменения первичной продукции фитопланктона Рыбинского водохранилища в связи с действием климатических факторов // Состояние и проблемы продукционной гидробиологии. — М.: КМК, 2006. — С. 36–46.
- Россолимо Л.Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. — М.: Наука. — 1977. — 144 с.
- Сигарева Л.Е. Методология использования растительных пигментов в изучении пресноводных экосистем // Водные экосистемы: трофические уровни и проблемы поддержания биоразнообразия: Мат. Всерос. конф. — Вологда: Коперник, 2008. — С. 99–102.
- Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А. Некоторые подходы к использованию свойств литоральных отложений для изучения продуктивности микрофитобентоса // Биол. внутр. вод. — 2004. — № 3. — С. 52–59.
- Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А. Растительные пигменты в донных отложениях как показатели экологического состояния водохранилищ // Актуальные проблемы рационального использования биологических ресурсов водохранилищ: Сб. науч. тр. — Рыбинск: Рыбин. Дом печати, 2005. — С. 270–282.
- Тимофеева Н.А., Сигарева Л.Е. Взаимосвязи концентраций растительных пигментов с азотом и фосфором в донных отложениях водохранилищ // Вод. рес. — 2004. — 31, № 3. — С. 332–336.
- Трифонов И.С., Воронцова Н.К., Макарец Е.С., Павлова О.А., Ульянова Д.С., Чеботарев Е.Н. Влияние климатических изменений и эвтрофирования на динамику планктонных популяций мезотрофного озера. — СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2003. — 125 с.
- Умнова Л.П. Скорость оседания взвешенных веществ в озерах умеренной зоны (Россия, Беларусь, Литва) // Гидробиол. журн. — 1999. — 35, № 3. — С. 77–87.
- Экологические проблемы Верхней Волги. — Ярославль: ЯГТУ, 2001. — 427 с.
- Adams M.S., Prentki R.T. Sedimentary pigments as an index of the trophic status of Lake Mead // Hydrobiologia. — 1986. — 143. — P. 71–77.
- Leavitt P.R. A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance // J. Paleolimnol. — 1993. — N 9. — P. 109–127.
- Lorenzen C.J. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations // Limnol., Oceanogr. — 1967. — 12, N 2. — P. 343–346.
- OECD. Eutrophication of waters: Monitoring, assessment and control. — 1982. — 155 p.
- Swain E.B. Measurement and interpretation of sedimentary pigments // Freshwat. Biol. — 1985. — 15. — P. 53–75.

Получена 18.03.10

Рекомендовал к печати А.И. Божков

*L.Ye. Sigareva, N.A. Timofeeva*

I.D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences,  
152742 Settle of Borok, Nekouzskiy District, Yaroslavl Region, Russia

INTERANNUAL DYNAMIC OF SEDIMENTARY CHLOROPHYLL *a* CONTENT  
IN THE RYBINSK RESERVOIR (RUSSIA)

The maintenance of vegetative pigments in the top layers of polytypic bottom sediments during the years 1993–2009 in Rybinsk reservoir is studied and comparison with indicators of productivity of phytoplankton is determined. The reduction of a sedimentary chlorophyll (chlorophyll *a* plus pheopigments) content on river-bed stations is determined. Average concentration for period at stations varied in a range of values (3–284 mkg/g dry weight sediment in a layer of 0–2,5 cm and 1,8–260,7 – in a layer of 0–5 cm), characteristic of different trophic type. The maximum values of the mean annual concentration (176,4 mkg/g dry weight sediment) was observed in ecoton sediment, and minimum (30,4) – in lake parts with mosaic ground. Results of investigation testify to reduction of eutrophication reservoir rate.

**Key words:** chlorophyll *a*, bottom sediment, interannual dynamic, Rybinsk Reservoir.