

УДК 556.555.6:581.132

СОДЕРЖАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ В ОТЛОЖЕНИЯХ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ГОД С ЭКСТРЕМАЛЬНО ЖАРКИМ ЛЕТОМ (2010 год)

Л. Е. Сигарева, Н. А. Тимофеева

*Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН
Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок
E-mail: sigareva@ibiw.yaroslavl.ru*

Поступила в редакцию 08.02.11 г.

Содержание растительных пигментов в отложениях Рыбинского водохранилища в год с экстремально жарким летом (2010 год). – Сигарева Л. Е., Тимофеева Н. А. – Изучали фонд растительных пигментов в отложениях водохранилища с мозаичной структурой грунтов в различные по температурному режиму годы: 2009 – обычный, 2010 – экстремальный. Результаты анализировали, учитывая многолетнюю динамику хлорофилла в планктоне и донных отложениях. Установили, что в аномально жаркий год возрастают абсолютные концентрации хлорофилла с феопигментами и уменьшается относительное содержание каротиноидов. Соотношение между концентрациями осадочных пигментов (хлорофилл+феопигменты) в слоях 0 – 2.5 и 2.5 – 5 см в экстремальном году больше, чем в обычном. Результаты позволили предположить, что в 2010 г. были созданы предпосылки для увеличения продуктивности фитопланктона в будущем.

Ключевые слова: растительные пигменты, донные отложения, Рыбинское водохранилище, экстремальная жара, 2010 год.

Plant pigment content in the Rybinsk reservoir deposits in a year with an extremely hot summer (2010). – Sigareva L. Ye. and Timofeeva N. A. – The stock of plant pigments in the bottom sediments of a reservoir with their mosaic structure in several years with various temperature conditions (2009 was normal and 2010 was extreme) was studied. The results were analyzed by considering the long-term chlorophyll dynamics in the plankton and bottom sediments. It was found that the absolute concentrations of chlorophyll with pheopigments increased and the relative content of carotenoids decreased in an abnormally hot year. The ratio between the sedimentary pigment (chlorophyll + pheopigments) concentrations in the 0 – 2.5 and 2.5 – 5 cm sediment layers in the extreme year was higher than that in the normal year. Preconditions for an future increase in the phytoplankton productivity were assumed to appear in 2010.

Key words: plant pigments, bottom sediments, Rybinsk reservoir, extreme heat, 2010.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе эволюции биосферы климат характеризуется чрезвычайно высокой изменчивостью, и единого мнения о направленности его флуктуаций (к потеплению или похолоданию) не существует. Все чаще отмечаемые экстремальные отклонения количественных показателей погоды от среднескользящих значений свидетельствуют об экологическом кризисе, и далеко не все ясно о влиянии таких аномалий на экосистемы. Критическая для человека, аномальная за последние 130 лет метеонаблюдений, жара летом 2010 г. (до 35 – 40°C) на территории европейской части России стала причиной повсеместных пожаров. Реакция

СОДЕРЖАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ

водных экосистем проявлялась интенсивным «цветением» воды синезелёными водорослями, гибелью рыбы и других гидробионтов. Изучение влияния аномально высокой температуры на продукционные характеристики дна водоёмов представляет особый интерес, поскольку именно донные отложения служат «летописью» изменений в экосистеме в историческом и геологическом масштабах времени. Для воссоздания информации, зашифрованной в природных записях, необходимо знать закономерности связей между биотическими и абиотическими условиями. В этом аспекте интенсивно исследуется пространственно-временное распределение растительных пигментов в различных компонентах водных экосистем (Пырина и др., 2006; Сигарева, 2006; Минеева, 2009; Leavitt, 1993; Kowalewska, 2001; Reuss et al., 2005 и др.), но наименее изученным остается фонд седиментационных пигментов водохранилищ.

Цель работы – оценить влияние экстремально высокой температуры на формирование фонда осадочных пигментов в крупном неглубоком водохранилище, характеризующемся сложным грунтовым комплексом (на примере Рыбинского).

Рыбинское водохранилище – одно из крупнейших (площадь при НПУ – 4550 км², объём – 25,4 км³, средняя глубина – 5,6 м) на Волге, на котором проводится экологический мониторинг практически с начала наполнения (Экологические проблемы..., 2001). Первичная продукция водохранилища создается в основном за счет фитопланктона. По содержанию хлорофилла *a* водорослей водохранилище характеризуется как мезотрофно-эвтрофное. В настоящее время для Рыбинского водохранилища характерно уменьшение продуктивности (Девяткин, 2003; Минеева, 2009; Лазарева, 2010; Сигарева, Тимофеева, 2011). С 1976 г. прослеживается повышение средней за вегетационный период температуры воды (Литвинов, Рошупко, 2002). Выявлена сопряженность многолетней динамики содержания хлорофилла и первичной продукции фитопланктона с изменениями приходящей солнечной радиации (Пырина и др., 2006). Получены данные о межгодовой изменчивости содержания растительных пигментов в донных отложениях водохранилища (Сигарева, Тимофеева, 2011). Выявлена тенденция снижения скорости осадконакопления и увеличения относительной площади песчаных грунтов (Законнов, 1995, 2007). Показана положительная зависимость от температуры показателей первичной продукции, а также деструкции органического вещества планктона и донных отложений (Романенко, 1985; Девяткин, 2003; Минеева, 2009; Дзюбан, 2010).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Пробы донных отложений собирали в комплексных экспедициях ИБВВ РАН на постоянных станциях в речном Волжском (ст. 1 – Коприно, ст. 2 – Молога) и озеровидном Главном (ст. 3, 4, 5, 6 – Наволок, Измайлово, Средний Двор, Брейтово соответственно) плёсах Рыбинского водохранилища с июня по октябрь 2009 г. и с мая по октябрь 2010 г. Описание этих станций приведено в работе (Сигарева, 2010). Расширенные съемки во всех плесах (Волжский, Моложский, Шекснинский, Главный) охватывали дополнительно 20 станций в 2009 г. (9 – 11 июля, 4 – 9 августа, 2 – 5 сентября, 19 – 22 октября) и 22 станции в 2010 г. (4 – 7 мая, 28 – 30

июня, 6 – 9 июля, 24 – 27 августа, 5 – 8 октября). Глубины на большинстве станций превышали толщину фотосинтезирующей зоны и составляли 9.4 ± 0.4 и 9.7 ± 0.4 м в 2009 и 2010 г. соответственно. Средние глубины на постоянных станциях 1 – 6 составляли соответственно 11.5, 12.8, 6.8, 6.4, 10.6 и 12.2 м.

Донные отложения отбирали стратометром. Анализировали верхние слои – 0 – 2.5 см и 2.5 – 5 см. Определяли характеристики пигментного фонда спектрофотометрическим методом, влажность, воздушно-сухую объёмную массу отложений и показатели водной среды (температуру, прозрачность), как и в других работах (Сигарева, 2006, 2010; Законнов, 2007).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температура. В 2010 г. (с экстремально жарким летом) тенденции пространственных и сезонных изменений температуры верхнего слоя воды были типичными для Рыбинского водохранилища (рис. 1). Наибольшие различия этого показателя

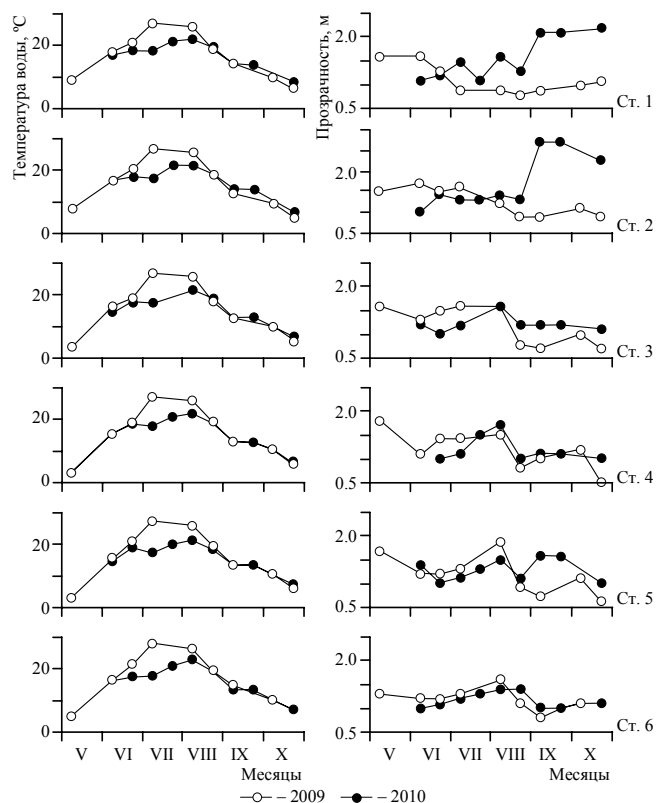


Рис. 1. Сезонная динамика температуры верхнего слоя и прозрачности воды на постоянных станциях Рыбинского водохранилища в 2009 и 2010 гг.

по акватории наблюдались в мае ($C_v = 50\%$) и октябре ($C_v = 11\%$), наименьшие – в летний период ($C_v = 1 - 5\%$), когда более равномерно прогревы водные массы. Летом 2010 г. температура воды достигала 27.9°C , в 2009 г. вода прогревалась меньше – до 22.8°C .

Прозрачность воды в 2010 г. (пределы $0.5 - 1.9$ м, среднее 1.1 ± 0.0 м) была ниже, чем в 2009 г. (пределы $0.7 - 2.7$ м, среднее 1.3 ± 0.0 м), и в целом похожа на наиболее часто отмечаемые значения (Экологические проблемы..., 2001). Характер сезонной динамики прозрачности наиболее четко различался между речными и озёровидными станциями (см. рис. 1). Согласно обратной зависимости прозрачности от количе-

СОДЕРЖАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ

ства планктонной взвеси, можно полагать, что в экстремальном году концентрация хлорофилла превышала таковую в обычном году, причем наиболее сильно в Волжском плёсе. Уровень концентраций при прозрачности 1.1 – 1.3 м в 1978 – 1995 гг. изменялся от 8 до 19 мкг/л, т.е. в пределах мезотрофно-эвтрофных величин (Пырина и др., 2006).

Характеристика пигментного фонда. В условиях сильного прогрева воды можно было ожидать существенное повышение продукционных показателей. В 2010 г. характеристики фонда пигментов в донных отложениях отличались от таковых в другие годы. Так, максимальная концентрация осадочного хлорофилла (хлорофилл+феопигменты, Хл+Ф) в верхнем слое отложений (0 – 2.5 см) в 2010 г. (297.5 мкг/г сухого грунта) не достигала абсолютного максимума, отмеченного для всего предшествующего периода наблюдений (593.6 мкг/г сухого осадка в 1993 – 2009 гг.) (Сигарева, Тимофеева, 2001, 2011; Sigareva, Sharapova, 2000). Наиболее часто встречаемые концентрации пигментов в 2010 г. смещены по сравнению с таковыми в предыдущем году в область значений, относящихся к категории эвтрофных и высокотрофных величин, согласно градации (Möller, Scharf, 1986) (рис. 2).

Сезонная динамика осадочных пигментов на станциях водоёмов обычно характеризуется подъёмами (весенний, или раннелетний, и осенний), следующими за вспышками развития фитопланктона (Экология фитопланктона..., 1989; Hilton et al., 1991). В первых исследованиях седиментационного фонда растительных пигментов Рыбинского водохранилища было выявлено, что сезонная изменчивость концентрации осадочного хлорофилла сопряжена с неоднородностью распределения типов отложений (Сигарева, 2010). В настоящей работе подтверждается, что основной причиной наиболее сильной сезонной вариативности концентраций осадочного хлорофилла на ряде участков является мозаичность грунтов (ст. 3 и 4 в Главном плёсе) (рис. 3). В однотипных отложениях сезонная динамика пигментов характеризуется появлением пиков в типичные периоды – ранним летом и осенью. Отличия сезонных изменений в 2010 г. – смещение осеннего подъёма на более поздние сроки, а также превышение осеннего максимума над весенним подъёмом. Кроме того, значения абсолютных максимумов

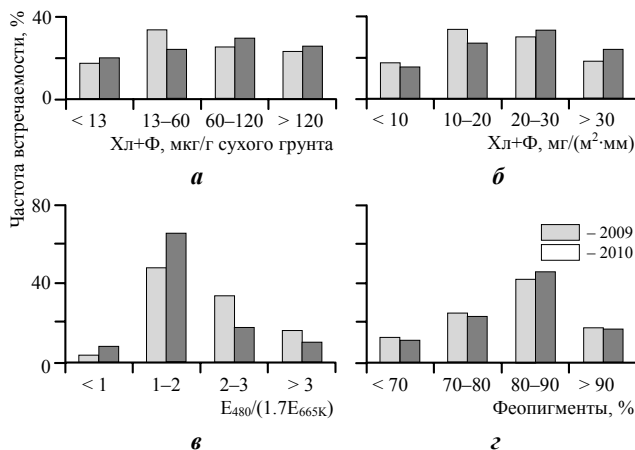


Рис. 2. Гистограммы распределения характеристик содержания (а, б) и деградации (в, г) растительных пигментов в донных отложениях на станциях Рыбинского водохранилища в 2009 и 2010 гг. Хл+Ф – хлорофилл + феопигменты

мов концентраций пигментов в 2010 г. на большинстве станций были больше, чем в предыдущий год. Наиболее значительные коэффициенты вариации для

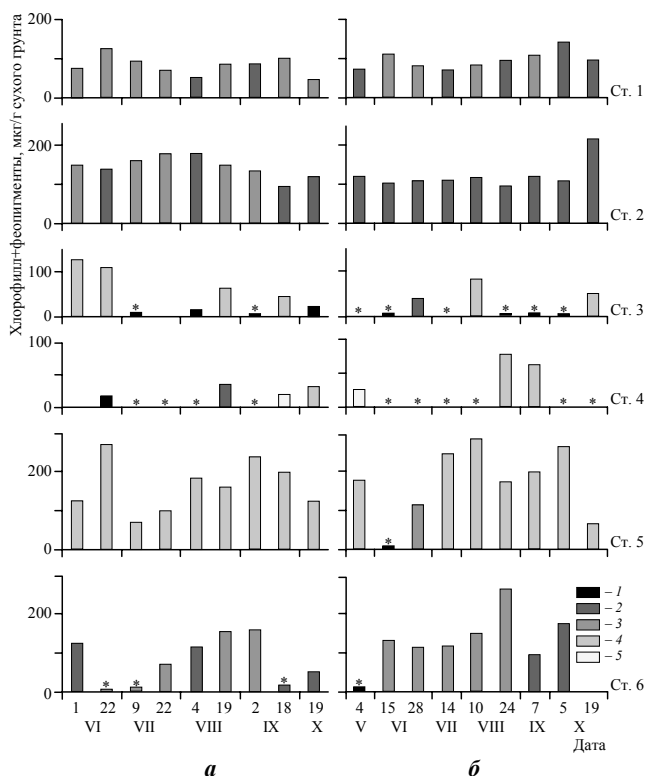


Рис. 3. Сезонная динамика суммарной концентрации хлорофилла с феопигментами в донных отложениях на постоянных станциях Рыбинского водохранилища в 2009 (а) и 2010 (б) гг.: 1 – песок или илистый песок, 2 – песчанистый, 3 – глинистый, 4 – торфогенный, 5 – торфянистый илы; * – низкие или следовые концентрации

станций были отмечены в экстремальном году (на ст. 3 и 4 C_v достигал 144 и 161%) (табл. 1, см. рис. 2, 3).

Пространственная изменчивость. Пределы коэффициента вариации (C_v), характеризующего изменения концентраций пигментов в пространстве, варьируют меньше (до 106%), чем в сезонном аспекте на отдельных станциях (до 161%) (см. табл. 1, табл. 2). Среднее значение C_v в 2009 г. составляет 75%, в 2010 – 86%. Следовательно, в экстремальном году изменчивость по станциям (пространственная) больше, чем в обычный год. Причиной может быть уменьшение гидродинамической активности в штилевую погоду, усиливающее неоднородное распределение и седиментацию фитопланктона.

Таблица 1

Оценка временной вариабельности содержания растительных пигментов в отложениях, температуры и прозрачности воды на постоянных станциях Рыбинского водохранилища в 2009 и 2010 гг.

Станция	Год	$t, ^\circ\text{C}$	Прозрачность, м	Хл+Ф, мкг/г сухого грунта	E_{480}/E_{665}	$E_{480}/(1.7E_{665})$
1	2	3	4	5	6	7
1	2009	16.9±1.5 (25)	1.6±0.2 (28)	81.3±8.9 (31)	2.97±0.19 (18)	1.86±0.11 (16)
	2010	16.6±2.6 (44)	1.1±0.1 (27)	95.2±7.8 (23)	2.45±0.15 (17)	1.57±0.09 (16)
2	2009	16.6±1.6 (28)	1.7±0.2 (39)	138.8±9.3 (19)	2.68±0.14 (15)	1.85±0.07 (11)
	2010	16.0±2.7 (49)	1.3±0.1 (26)	122.9±12.8 (29)	2.66±0.14 (14)	1.84±0.07 (10)

СОДЕРЖАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
3	2009	15.4±1.8 (31)	1.2±0.1 (14)	49.1±18.3 (99)	2.94±0.34 (30)	1.91±0.21 (29)
	2010	15.3±2.9 (54)	1.2±0.1 (33)	19.5±9.9 (144)	1.89±0.36 (54)	1.23±0.23 (52)
4	2009	16.3±2.0 (32)	1.2±0.1 (22)	13.7±5.8 (113)	4.37±1.67 (101)	2.90±1.17 (107)
	2010	15.5±3.0 (55)	1.2±0.1 (33)	18.9±10.8 (161)	4.69±1.70 (102)	3.06±1.11 (102)
5	2009	16.4±1.6 (28)	1.3±0.1 (19)	161.1±23.7 (42)	3.66±0.44 (34)	2.43±0.29 (34)
	2010	16.0±3.1 (54)	1.2±0.2 (36)	172.4±33.3 (55)	3.04±0.16 (15)	1.95±0.10 (15)
6	2009	16.3±1.7 (29)	1.2±0.1 (14)	82.8±23.1 (79)	2.94±0.53 (51)	1.99±0.38 (54)
	2010	17.5±2.9 (44)	1.2±0.1 (19)	138.8±28.9 (55)	2.39±0.11 (12)	1.60±0.08 (13)

Примечание. Приведены средние с ошибкой, в скобках – коэффициент вариации во времени, %.

Многолетняя динамика концентрации Хл+Ф на постоянных станциях водохранилища неодинакова. Так, средние арифметические концентрации за период наблюдений 2010 г. на всех станциях достоверно не отличались от таковых в 2009 г., несмотря на различия в сезонной динамике (см. табл. 1 и рис. 2). Значения средних были существенно меньше, чем в 1993 г. (Сигарева, 2010). Однако, по сравнению со среднемноголетними (1993 – 2009 гг.) концентрациями, в 2010 г. содержание пигментов увеличилось только на станциях (ст. 5, 6 в Главном плёсе), испытывающих влияние водных масс р. Шексны и Мологи, и уменьшилось на остальных. Наибольшая вариабельность средних концентраций в многолетнем, как и в сезонном, аспектах характерна для станций с мозаичным типом отложений.

Таблица 2

Оценка пространственной изменчивости содержания растительных пигментов в отложениях, температуры и прозрачности воды на постоянных станциях Рыбинского водохранилища в разные сроки 2009 и 2010 гг.

Сроки	t , °C	Прозрачность, м	Хл+Ф, мкг/г сухого грунта	E_{480}/E_{665}	$E_{480}/(1.7E_{665к})$
1	2	3	4	5	6
2009 г.					
1.06	15.9±0.5 (6)	1.1±0.1 (15)	119.9±13.6 (23)	2.49±0.14 (11)	1.70±0.08 (9)
22.06	18.3±0.3 (4)	1.1±0.1 (14)	110.3±42.4 (86)	2.26±0.20 (20)	1.51±0.14 (21)
9.07	17.8±0.1 (1)	1.2±0.1 (12)	55.1±26.9 (109)	2.58±0.37 (32)	1.66±0.26 (36)
22.07	21.0±0.2 (2)	1.3±0.1 (11)	80.7±30.7 (76)	3.55±0.68 (38)	2.32±0.47 (41)
4.08	21.9±0.2 (2)	1.5±0.1 (8)	91.2±35.7 (88)	3.15±0.34 (24)	2.08±0.21 (23)
19.08	19.0±0.0 (1)	1.2±0.1 (12)	108.0±24.1 (50)	3.01±0.18 (13)	1.95±0.10 (11)
2.09	17.6±0.1 (1)	1.4±0.1 (9)	104.4±41.5 (89)	2.16±0.24 (25)	1.40±0.18 (29)
28.09	13.4±0.2 (4)	1.6±0.3 (41)	79.2±31.2 (88)	3.72±0.66 (40)	2.49±0.52 (47)
19.10	7.0±0.4 (12)	1.5±0.3 (43)	64.4±19.3 (67)	6.21±1.91 (69)	4.16±1.33 (71)
2010 г.					
4.05	5.3±1.2 (50)	1.6±0.1 (11)	87.2±31.0 (103)	3.67±1.65 (101)	2.58±1.29 (112)
15.06	16.5±0.4 (5)	1.4±0.1 (18)	60.1±28.4 (106)	2.24±0.32 (32)	1.42±0.21 (33)
28.06	20.04±0.4 (5)	1.4±0.1 (10)	76.9±21.9 (64)	2.70±0.26 (21)	1.78±0.17 (21)
14.07	27.2±0.2 (2)	1.4±0.1 (19)	92.6±41.9 (101)	4.48±2.28 (114)	2.80±1.30 (104)
10.08	26.0±0.1 (1)	1.5±0.2 (24)	121.0±42.9 (79)	2.37±0.12 (11)	1.49±0.10 (15)
24.08	18.9±0.3 (3)	0.9±0.1 (13)	90.8±24.5 (60)	2.61±0.40 (34)	1.70±0.27 (36)

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
7.09	13.5±0.5 (5)	0.8±0.1 (15)	130.7±44.1 (76)	2.78±0.23 (19)	1.44±0.19 (30)
5.10	10.0±0.1 (3)	1.1±0.0 (7)	117.0±46.6 (89)	2.11±0.27 (29)	1.44±0.19 (30)
19.10	5.6±0.3 (11)	0.8±0.1 (32)	86.5±40.6 (94)	2.79±0.39 (28)	1.83±0.20 (22)

Примечание. Приведены средние с ошибкой, в скобках – коэффициент вариации в пространстве, %.

Связь концентраций растительных пигментов с типом грунта была установлена ранее (Сигарева, Тимофеева, 2001; Sigareva, Sharapova, 2000). Во все годы наблюдений, включая 2010 с аномальной жарой, концентрации Хл+Ф в расчете на сухой грунт увеличивались в ряду: песок, илистый песок, торфянистый ил, песчаный ил, серый глинистый ил, торфогенный ил. При этом среднее содержание пигментов в отдельных грунтах изменялось во времени. В 2010 г. содержание пигментов в илах стало немного выше, чем в предыдущий год, но оно не достигло уровня величин, характерных для соответствующих типов отложений в другие годы (1996 – 1998) (табл. 3) (Sigareva, Sharapova, 2000). Неравномерность пространственного распределения концентраций пигментов в связи с мозаичностью грунтового комплекса необходимо учитывать при оценке средних для водоёма.

Средняя для водохранилища концентрация Хл+Ф, рассчитанная с учетом площадей разнотипных отложений (Законнов, 1995) в слое 0 – 2.5 см составила в 2009 г. 26.6±7.6, в 2010 г. – 29.8±8.3 мкг/г сухого грунта или 10.8±2.7 и 10.4±3.8 мг/(м²·мм) сырого осадка соответственно. Среднее для этих лет – 28.1±7.5 мкг/г сухого грунта или 10.4±3.2 мг/м²·мм сырого осадка, что заметно меньше, чем в 1996 – 1998 гг.

Таблица 3

Содержание растительных пигментов
в донных отложениях разного типа
в Рыбинском водохранилище в 2009 и 2010 гг.

Тип грунта	Хлорофилл+феопигменты			
	мкг/г сухого грунта		мг/(м ² ·мм)	
	2009	2010	2009	2010
Песок	3.7±3.5	1.3±0.3	4.9±4.6	1.6±0.3
Илистый песок	9.3±1.3	8.6±1.0	9.2±1.1	9.2±1.5
Торфянистый ил	20.5±0.0	24.3±0.0	1.8±0.0	3.7±0.0
Песчаный ил	60.5±6.9	75.7±6.8	23.1±1.5	26.3±1.4
Глинистый ил	105.8±12.3	123.8±18.3	27.0±2.1	28.8±2.7
Торфогенный ил	115.3±14.3	136.7±15.8	20.0±1.7	21.4±1.6

(37.0 мкг/г сухого грунта и 15.3 мг/(м²·мм) сырого осадка) (Sigareva, Sharapova, 2000). Во все годы наблюдений средние величины содержания Хл+Ф в донных отложениях Рыбинского водохранилища относятся к категории мезотрофных, согласно (Möller, Scharf, 1986).

Показатели деградации пигментов соответствовали

характеру биотопа – донным отложениям, в которых растительные пигменты представлены в основном продуктами разрушения (Сигарева, 2006, 2010; Leavitt, 1993). В год с аномальной жарой фонд зелёных пигментов в отложениях представлен, как и в предыдущем, преимущественно продуктами деградации хлорофилла – феопигментами (82±1%). Не выявлено принципиальных отличий в степени деградации хлорофилла по сравнению с аналогичным показателем в другие годы (см. рис. 2). Однако соотношение жёлтых и зелёных пигментов уменьшилось: индексы E_{480}/E_{665} и $E_{480}/(1.7E_{665к})$ в 2010 г. стали меньше, чем в 2009 г. (см. рис. 2 и табл. 1, 2),

СОДЕРЖАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ

и оказались ближе к типичным значениям волжского фитопланктона (в мезотрофных и эвтрофных водах – 1.2 и 1.1 соответственно, см. по : Минеева, 2009). Согласно исследованиям (Даченко, 2007; Мартынова, 2010), можно полагать, что в 2010 г. в верхних слоях донных отложений сложились более благоприятные условия для сохранения органического вещества и пигментов из-за обеднения придонных слоев воды кислородом вследствие продолжительной штилевой погоды и стратификации.

Между содержанием осадочного хлорофилла в слоях (0 – 2.5 и 2.5 – 5 см), считающихся наиболее метаболически активными, существует положительная зависимость (в 2009 г. $r = 0.73$, в 2010 г. $r = 0.85$), отражающая в большинстве случаев уменьшение скорости деструкционных процессов и концентрации растительных пигментов в нижних слоях. В 2010 г. соотношение между концентрациями пигментов в сравниваемых слоях стало больше, чем в 2009 г., что тоже свидетельствует об увеличении накопления и уменьшении скорости деградации пигментов в верхнем слое (0 – 2.5 см) (табл. 4).

Таблица 4

Соотношение между концентрациями пигментов (мкг/г сухого осадка) в верхних слоях донных отложений на постоянных станциях в Рыбинском водохранилище в 2009 и 2010 гг.

Станция	$(Хл+Ф)_1/(Хл+Ф)_2$		$(Хл+Ф)_1/(Хл+Ф)_3$	
	2009	2010	2009	2010
1	1.20±0.07	1.78±0.33	1.08±0.03	1.22±0.07
2	1.28±0.09	1.34±0.19	1.11±0.03	1.12±0.05
3	2.44±0.92	1.88±0.34	1.24±0.14	1.23±0.10
4	0.63±0.24	1.28±0.26	0.71±0.21	1.01±0.15
5	1.66±0.44	1.75±0.44	1.12±0.11	1.18±0.09
6	1.17±0.22	1.94±0.59	1.01±0.14	1.20±0.11
Среднее*	1.45±0.17	1.67±0.15	1.08±0.04	1.17±0.03

Примечание. $(Хл+Ф)_1$ – хлорофилл+феопигменты в слое 0 – 2.5, $(Хл+Ф)_2$ – в слое 2.5 – 5, $(Хл+Ф)_3$ – в слое 0 – 5 см; * в 2009 г. $n = 45$, в 2010 г. $n = 49$.

Условия аномального года практически не повлияли на характер связей концентрации осадочного хлорофилла с абиотическими факторами. Однако коэффициент корреляции между содержанием пигментов и глубиной в 2010 г. увеличился и составил 0.56, тогда как в 2009 и 1996 – 1998 гг. $r = 0.45$ (Sigareva, Sharapova, 2000), что может отражать ослабление влияния гидродинамики вод на распределение планктона в штилевых условиях. Более тесной остается связь осадочного хлорофилла с влажностью – одного из типологических показателей отложений (в 2009 г. $r = 0.74$, в 2010 г. $r = 0.78$).

Таким образом, сравнение пигментных характеристик в аномальный и обычные годы позволило оценить влияние экстремальной жары на продукционные свойства донных отложений водохранилища. При сходной динамике температуры по акватории водохранилища выявлена неодинаковая изменчивость продукционных показателей. Повышение температуры несущественно повлияло на среднее содержание седиментационных пигментов. В 2009 – 2010 гг. отмечалось уменьшение его уровня по сравнению с таковым в 1993 – 1998 гг., что согласуется с представлениями о деэвтрофировании его экосистемы, хотя при этом продукционный статус водоёма сохранился на уровне мезотрофии. Кроме того, повышение температуры изменило динамику и соотношение концентрации зелёных и жёлтых растительных пигментов в донных отложениях. Есть основания полагать, что в 2010 г.

сложились более благоприятные условия для сохранения растительных пигментов и, естественно, органического вещества. В будущем можно ожидать увеличение интенсивности деструкции органического вещества, высвобождение биогенных элементов в воду и увеличение продуктивности планктона, поскольку концентрации пигментов в отложениях связаны прямой положительной зависимостью с концентрациями биогенных элементов (Тимофеева, Сигарева, 2004). Следовательно, после продолжительного периода деэвтрофирования водохранилища, отмечаемого по различным гидробиологическим и гидрологическим показателям (Девяткин, 2003; Законнов, 2007; Минеева, 2009; Лазарева, 2010), возможна активизация эвтрофирования экосистемы этого водоёма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты продемонстрировали единство биотических и абиотических факторов, обуславливающих продуктивность экосистемы водохранилища. «Отклик» пигментного фонда донных отложений на аномально высокую температуру зависит от особенностей биотопов и динамики абиотических условий, а в целом для водоёма наиболее четко выражен в уменьшении содержания жёлтых пигментов относительно зелёных, увеличении отношения концентрации Хл+Ф в верхнем слое отложений к таковой в нижерасположенном, но при сохранении прежнего трофического статуса водохранилища.

Примененные авторами способы анализа и интерпретации полевого материала подтвердили уникальные возможности растительных пигментов как показателей пространственно-временной изменчивости продукционных свойств водных экосистем. Используемые в работе методические и методологические подходы можно рекомендовать для изучения механизма взаимодействия эвтрофирования и деэвтрофирования, а также для мониторинга продуктивности водохранилищ с сильно выраженной неоднородностью донных отложений.

Авторы выражают благодарность Т. П. Зайкиной за помощь при сборе и обработке проб.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Даценко Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М. : ГЕОС. 2007. 252 с.
- Девяткин В. Г. Структура и продуктивность литоральных альгоценозов водохранилищ Верхней Волги : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2003. 43 с.
- Дзюбан А.Н. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль : Принтхаус, 2010. 192 с.
- Законнов В. В. Пространственно-временная неоднородность распределения и накопления донных отложений верхневолжских водохранилищ // Водные ресурсы. 1995. Т. 22, № 3. С. 362 – 371.
- Законнов В. В. Осадкообразование в водохранилищах волжского каскада : автореф. дис. ... д-ра географ. наук. М., 2007. 42 с.

СОДЕРЖАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ

Лазарева В. И. Структура и динамика зоопланктона Рыбинского водохранилища. М. : Т-во науч. изд. КМК, 2010. 183 с.

Литвинов А. С., Роцупко В. Ф. Многолетние изменения элементов гидрометеорологического режима Рыбинского водохранилища // Актуальные проблемы экологии Ярославской области : материалы Второй науч.-практ. конф. / Верхневолж. отд-ние РЭА. Ярославль, 2002. С. 33 – 39.

Мартынова М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М. : Наука, 2010. 234 с.

Минеева Н. М. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль : Принтхаус, 2009. 279 с.

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. : Т-во науч. изд. КМК, 2006. С. 36 – 46.

Романенко В. И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1985. 295 с.

Сigareва Л. Е. Формирование и трансформация фонда растительных пигментов в водоемах верхневолжского бассейна : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2006. 47 с.

Сigareва Л. Е. Содержание хлорофилла в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища // Биология внутренних вод. 2010. № 3. С. 38 – 46.

Сigareва Л. Е., Тимофеева Н. А. Растительные пигменты в донных отложениях как показатели трофического состояния водохранилищ Верхней Волги // Проблемы региональной экологии. 2001. № 2. С. 23 – 35.

Сigareва Л. Е., Тимофеева Н. А. Межгодовая динамика хлорофилла в донных отложениях Рыбинского водохранилища (Россия) // Альгология. 2011. № 2. С. 190 – 201.

Тимофеева Н. А., Сigareва Л. Е. Взаимосвязи концентраций растительных пигментов с азотом и фосфором в донных отложениях водохранилищ // Водные ресурсы. 2004. Т. 31, № 3. С. 332 – 336.

Экологические проблемы Верхней Волги. Ярославль : Изд-во Ярослав. гос. техн. ун-та, 2001. 427с.

Экология фитопланктона Куйбышевского водохранилища. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1989. 304 с.

Hilton J., Lishman J. P., Carrick T. R., Allen P. V. An assessment of the sources of error in estimations of bulk sedimentary pigment concentrations and its implications for trophic status assessment // Hydrobiologia. 1991. Vol. 218, № 3. P. 247 – 254.

Kowalewska G. Algal pigments in Baltic sediments as markers of ecosystem and climate changes // Climate Research. 2001. Vol. 18. P. 89 – 96.

Leavitt P. R. A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance // J. Paleolimnol. 1993. № 9. P. 109 – 127.

Möller W. A. A., Scharf B. W. The content of chlorophyll in the sediment of the volcanic maar lakes in the Eifel region (Germany) as an indicator for eutrophication // Hydrobiologia. 1986. Vol. 143. P. 327 – 329.

Reuss N., Conley D. J., Bianchi T.S. Preservation conditions and the use of sediment pigments as a tool for recent ecological reconstruction in four Northern European estuaries // Marine Chemistry. 2005. Vol. 95. P. 283 – 302.

Sigareva L. E., Sharapova N. A. Estimation of bulk sedimentary pigment concentrations in Rybinsk reservoir, Upper Volga, Russia // Озера холодных регионов. Ч. III. Гидрогеохимические вопросы : материалы Междунар. конф. Якутск : Изд-во Якутского гос. ун-та, 2000. С. 5 – 15.