

УДК 556.555.6:581.132

ОСАДОЧНЫЕ ПИГМЕНТЫ И СКОРОСТЬ ИЛОНАКОПЛЕНИЯ КАК ПОКАЗАТЕЛИ ТРОФИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА¹

© 2013 г. Л. Е. Сигарева, В. В. Законнов, Н. А. Тимофеева, В. В. Касьянова

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

152742 пос. Борок Некоузского р-на Ярославской обл.

E-mail: sigareva@ibiw.yaroslavl.ru

Поступила в редакцию 12.11.2010 г.

Изучены вертикальное распределение осадочных пигментов (суммы хлорофилла *a* с феопигментами) и скорость илонакопления за период существования Рыбинского водохранилища от заполнения в 1941 по 2009 г. Диапазон концентраций пигментов (7–232 мкг/г сухого осадка) в слоях кернов включает значения, характерные для всех типов трофического состояния водоемов, но большинство величин (81%) относится к категориям “мезотрофный” и “эвтрофный”. Среднее содержание пигментов в кернах для периодов между грунтовыми съемками, выполненными в 1955, 1978, 1992 и 2009 г., составило 525.4, 248.8, 200.6 и 142.3 мг/(м² год) соответственно. Средние скорости илонакопления на станциях уменьшались от съемки к съемке от 13.6–17.9 до 3.5–5.3 мм/год. Между среднегодовыми концентрациями пигментов в кернах и скоростью илонакопления установлена прямая положительная связь при более высоких величинах показателей в озеровидных участках по сравнению с речными.

Ключевые слова: стратиграфия, осадочные пигменты, водохранилище, илонакопление, трофическое состояние.

DOI: 10.7868/S0321059613010094

Исследование зависимости продуктивности пресноводных экосистем от осадкообразования и продукционных характеристик донных отложений (ДО) актуально для неглубоких водоемов, характеризующихся интенсивным воздействием осевшей из водной толщи взвеси [3, 7, 10, 17]. Однако механизм связи осадконакопления с трофическим состоянием водоемов исследован недостаточно. Для озер установлена высокая корреляция между первичной продукцией планктона и скоростью осадконакопления [7]. Для многих искусственных водоемов, особенно для сложных по морфометрии с исключительно высокой динамичностью абиотических условий и мозаичной структурой грунтового комплекса, такое сравнение не проводилось.

При исследованиях продукционных свойств разнотипных экосистем весьма важен анализ растительных пигментов в планктоне и ДО [9, 11, 12, 14, 19, 20, 22–24, 28]. Стратиграфические данные

по растительным пигментам имеют первостепенное значение для изучения круговорота органического вещества (ОВ), закономерностей формирования продуктивности водной экосистемы, реконструкции ее динамики и климата [19, 21, 22, 24, 25, 26]. Многолетние материалы необходимы для выяснения механизма эвтрофирования на разных этапах сукцессии водных экосистем, а также для прогнозирования экологического состояния водоемов. Очевидно, что репрезентативность прогнозов, как и данных, восстановленных по стратиграфии, зависит от степени изученности количественных связей между показателями продуктивности и абиотическими характеристиками биотопов.

Цель исследования – оценить применимость данных о вертикальном распределении растительных пигментов в ДО и интенсивности илонакопления в изучении трофического состояния неглубокого крупного водохранилища (на примере Рыбинского).

Рыбинское водохранилище относится к верховолжским водохранилищам и расположено в

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-04-00384).

зоне южной тайги. Площадь — 4550 км², средняя глубина — 5.6 м. Это — один из немногих крупных искусственных резервуаров пресной воды, на котором выполняются регулярные многолетние наблюдения за водными организмами и абиотическими факторами их жизнедеятельности [18]. Оценки скоростей осадкообразования и величин соотношения площадей разнотипных грунтов проводятся с 1955 г. через каждые 15–20 лет [4, 5], растительные пигменты в ДО изучаются эпизодически с 1993 г. [11, 12]. Первые данные о вертикальном распределении растительных пигментов в ДО водохранилища были получены для неполных коротких колонок (от 5 до 30 см) [15]. В данной работе представлены более подробные стратиграфические данные по растительным пигментам в ДО, сформировавшихся за весь период существования водохранилища, в связи с интенсивностью илонакопления. С позиций геоэкологии и продукционной гидробиологии наибольший интерес представляет илонакопление на глубоководных станциях, где происходят необратимые процессы седиментации и аккумуляции веществ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами для исследования послужили характеристики 302 слоев пяти колонок ДО, отобранных в июле 2009 г. в Рыбинском водохранилище на русловых станциях постоянных наблюдений, характеризующихся различной гидродинамической активностью. Глубины на станциях составили >10 м. Места отбора проб находились на речном Волжском плесе (Коприно, ст. 1), экотонном участке — в районе слияния водных масс Волжского и Главного плесов (Молога, ст. 2), озеровидном Главном плесе (Брейтово, ст. 3; Средний Двор, ст. 4) и речном Шекснинском плесе (ст. 5), подвергающемся влиянию г. Череповца (рис. 1).

Пробы (с ненарушенной структурой) отбирались до маркирующего первичного подстилающего горизонта грунтовой трубкой ГОИН длиной 1 м с диаметром вкладыша 4.5 см. Длина колонок на станциях с 1 по 5 — 49, 65, 54, 52 и 46 см, число анализируемых слоев — 62, 65, 66, 60 и 49 соответственно. Возраст колонок был приравнен ко всему периоду существования водохранилища (1941–2009 гг.) — 68 годам. Колонки делились на слои одинаковой толщины (0.7–1.0 см). Гранулометрический анализ образцов грунта выполнялся методом мокрого рассева на электромагнитной просеивающей установке “Analysette-3” фирмы Alfred Fritsch (Германия) с насадкой прецизионных микросит (до 5 μ). ОВ, естественную влажность и объемную массу отложений определяли

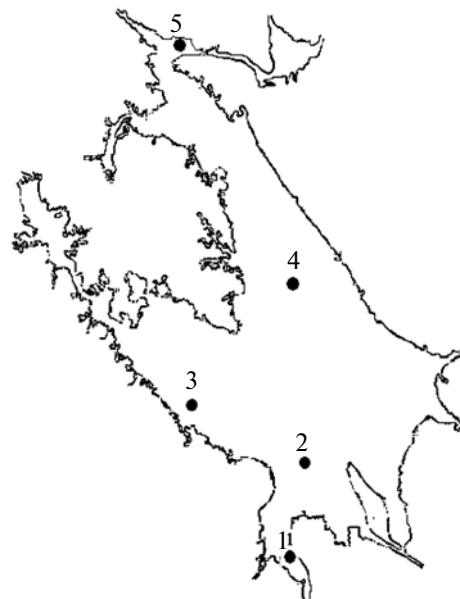


Рис.1. Карта-хема расположения станций (черные кружки) на Рыбинском водохранилище.

традиционными методами [1]. Растительные пигменты анализировались спектрофотометрическим методом в ацетоновом экстракте на спектрофотометре Лямбда-25 фирмы Perkin Elmer. Хлорофилл “а” и феопигменты рассчитывали по формулам Лоренцена [22], их сумму называли осадочными пигментами (ОП). Среднюю за год концентрацию пигментов для отдельных периодов оценивали с учетом скорости илонакопления за соответствующее время между грунтовыми съемками. Средняя скорость илонакопления на станциях в отдельные периоды существования водохранилища рассчитывалась исходя из разницы размеров кернов (от поверхности до маркирующего слоя), определенных во время последовательных грунтовых съемок (I — 1955, II — 1978, III — 1992, IV — 2009 гг.) с учетом продолжительности периодов между ними (табл. 1). Материалы зондирования ДО первых трех съемок — архивные данные лаборатории гидрологии и гидрохимии Института биологии внутренних вод РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Скорость осадконакопления — один из факторов, обуславливающих различия продуктивности водных экосистем в пространственно-временном аспекте [7]. В Рыбинском водохранилище этот показатель характеризуется максимальным значением среди других верхневолжских водохранилищ [5]. На исследуемых глубоководных

Таблица 1. Показатели илонакопления на станциях Рыбинского водохранилища по результатам грунтовых съемок (ИП – илистый песок, ПИ – песчанистый ил, ГИ – глинистый ил, ТИ – торфогенный ил; здесь и в табл. 2 и 3: I, II, III, IV – грунтовые съемки в 1955, 1978, 1992 и 2009 гг. соответственно)

| Показатель | Станция | I | II | III | IV | 1941–2009 гг. |
|--------------------------------|---------|------|-----|-----|-----|---------------|
| Тип грунта | 1 | ПИ | ГИ | ГИ | ГИ | Илы |
| | 2 | ПИ | ГИ | ГИ | ГИ | Илы |
| | 3 | ПИ | ГИ | ГИ | ГИ | Илы |
| | 4 | ТИ | ТИ | ТИ | ТИ | Илы |
| | 5 | ИП | ПИ | ГИ | ГИ | Илы |
| Толщина слоя, см | 1 | 21 | 13 | 7 | 8 | 49 |
| | 2 | 20 | 23 | 13 | 9 | 65 |
| | 3 | 19 | 18 | 10 | 7 | 54 |
| | 4 | 25 | 13 | 8 | 6 | 52 |
| | 5 | 20 | 12 | 7 | 7 | 46 |
| Скорость илонакопления, мм/год | 1 | 15 | 5.7 | 5 | 4.7 | 7.2 |
| | 2 | 14.3 | 10 | 9.3 | 5.3 | 9.6 |
| | 3 | 13.6 | 7.8 | 7.1 | 4.1 | 7.9 |
| | 4 | 17.9 | 5.7 | 5.7 | 3.5 | 7.6 |
| | 5 | 14.3 | 5.2 | 5 | 4.1 | 6.8 |

Таблица 2. Гранулометрические характеристики кернов Рыбинского водохранилища

| Показатель | Станция | I | II | III | IV | I–IV |
|----------------------------|---------|------|------|------|------|------|
| Коэффициент сортировки | 1 | 2.7 | 3.5 | 3.4 | 3.2 | 3.2 |
| | 2 | 2.5 | 3.7 | 3.5 | 3.3 | 3.3 |
| | 3 | 2.6 | 3.5 | 3.4 | 3.1 | 3.2 |
| | 4 | 3.4 | 3.3 | 3.2 | 3.0 | 3.2 |
| | 5 | 2.0 | 3.5 | 3.4 | 3.1 | 3.0 |
| Коэффициент асимметрии | 1 | 0.50 | 0.45 | 0.44 | 0.40 | 0.45 |
| | 2 | 0.55 | 0.50 | 0.45 | 0.39 | 0.47 |
| | 3 | 0.48 | 0.45 | 0.44 | 0.38 | 0.44 |
| | 4 | 0.35 | 0.33 | 0.32 | 0.32 | 0.33 |
| | 5 | 0.52 | 0.51 | 0.48 | 0.39 | 0.48 |
| Средний диаметр частиц, мм | 1 | 0.15 | 0.08 | 0.10 | 0.06 | 0.10 |
| | 2 | 0.11 | 0.09 | 0.06 | 0.05 | 0.08 |
| | 3 | 0.12 | 0.08 | 0.06 | 0.06 | 0.08 |
| | 4 | 0.07 | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.06 |
| | 5 | 0.25 | 0.09 | 0.05 | 0.05 | 0.11 |

станциях скорость илонакопления изменяется от 17.9 до 3.5 мм/год в зависимости от этапа существования водохранилища и типа биотопа (табл. 1). Скорость илонакопления варьирует по станци-

ям меньше ($C_v = 11–29\%$), чем в периоды между грунтовыми съемками ($C_v = 38–80\%$). Следовательно, ключевая роль в изменчивости этого показателя принадлежит временному фактору. Судя по приведенным выше коэффициентам вариации, минимальная изменчивость скорости илонакопления свойственна экотонной ст. 2, максимальная – озеровидной ст. 4.

Поэтапная (временная) изменчивость скорости илонакопления в Рыбинском водохранилище характеризуется тенденцией к уменьшению от съемки к съемке и неравномерностью по участкам. Максимальные величины показателей осадкообразования характерны для ядра экотонной станции, затем в порядке убывания можно выделить озеровидные и речные участки (табл. 1). За 17 лет, прошедшие после третьей грунтовой съемки, скорость илонакопления уменьшилась на озеровидных участках и в зоне экотона, но практически не изменилась на речных станциях. В целом за весь период эксплуатации водохранилища произошли существенные изменения в осадкообразовании – на всех станциях скорость илонакопления уменьшилась, на песчанистые илы наслоились глинистые, за исключением ст. 4, на которой во все периоды отмечался торфогенный ил.

Изменения типа грунта по вертикали колонки характеризуются неоднородной динамикой физико-химических свойств и гранулометрических характеристик, что позволило сравнить механические составы наносов, сформированных в различных условиях (табл. 2, 3). Одна из важнейших характеристик осадков – коэффициент сортировки – оценивается по трем категориям: хорошая, средняя и плохая, которым соответствуют величины <2 , $2–3$ и >3 [16]. В Рыбинском водохранилище хорошая сортированность осадков отмечалась в начальный период наполнения (с 1941 по 1947 г.), когда гидродинамические процессы наиболее интенсивно воздействовали на ложе. Коэффициент асимметрии, характеризующий распределение размеров фракций относительно среднего диаметра частиц, повсеместно уменьшался от первой грунтовой съемки к последней. Исключение составляет ст. 4, на которой изменения гранулометрических характеристик частиц выражены слабо. Напротив, на речной ст. 5 такие изменения особенно четко заметны из-за смены типов грунта в колонке – с илистого песка на песчанистый и глинистый илы.

Типологическим свойствам ДО соответствуют определенные закономерности распределения концентраций растительных пигментов. Пигменты в осадках представлены преимущественно

(~80–90%) феопигментами – продуктами деградации хлорофилла. Для всех колонок характерно чередование слоев с низким и высоким содержанием пигментов. Линии трендов концентраций ОП, рассчитанных на сухой осадок, показывают одинаковое направление изменений при неравномерных колебаниях их величин по толщине керна (рис. 2). В целом вертикальная изменчивость концентраций ОП имеет циклический характер, как и многолетняя изменчивость содержания ОВ в кернах. Сходство характеров изменчивости концентраций ОП и ОВ обуславливает достаточно тесную связь этих показателей во всех колонках, что подтверждается высокими коэффициентами детерминации (R^2): 0.30, 0.56, 0.58, 0.71, 0.20 на ст. 1–5 соответственно. Сравнительный анализ характеристик этой связи в разные периоды эксплуатационного срока водохранилища выявил ее неоднородность в пространственно-временном аспекте (рис. 3). Так, согласно полученным коэффициентам R^2 для двух одинаковых по толщине слоев в каждой колонке, теснота связи пигментов и ОВ практически не изменяется во времени в кернах торфогенного ила (ст. 4), уменьшается со временем на речной ст. 1 и увеличивается в остальных кернах (ст. 2, 3, 5) (рис. 3). Достаточно близкие и невысокие темпы изменений в содержании пигментов и ОВ в торфогенных илах, по-видимому, отражают наиболее благоприятные условия для их консервации.

Таблица 3. Физико-химические показатели кернов Рыбинского водохранилища

| Показатель | Станция | I | II | III | IV | I–IV |
|-----------------------------------|---------|------|------|------|------|------|
| Объемная масса, г/см ³ | 1 | 0.65 | 0.46 | 0.56 | 0.30 | 0.49 |
| | 2 | 0.57 | 0.53 | 0.43 | 0.34 | 0.47 |
| | 3 | 0.62 | 0.51 | 0.39 | 0.27 | 0.48 |
| | 4 | 0.68 | 0.23 | 0.19 | 0.11 | 0.43 |
| | 5 | 1.44 | 0.68 | 0.55 | 0.30 | 1.00 |
| Влажность, % | 1 | 58.7 | 63.6 | 57.7 | 79.0 | 62.3 |
| | 2 | 56.5 | 48.9 | 66.4 | 71.9 | 58.0 |
| | 3 | 56.5 | 60.7 | 69.1 | 76.5 | 64.2 |
| | 4 | 57.1 | 79.7 | 82.9 | 87.6 | 69.8 |
| | 5 | 26.1 | 51.1 | 59.2 | 78.7 | 43.3 |
| ОВ, % | 1 | 14.5 | 16.3 | 9.2 | 15.3 | 14.4 |
| | 2 | 14.5 | 9.6 | 17.1 | 21.2 | 14.1 |
| | 3 | 10.3 | 12.9 | 13.1 | 23.9 | 14.2 |
| | 4 | 20.3 | 36.2 | 33.6 | 34.8 | 27.7 |
| | 5 | 3.4 | 9.7 | 9.5 | 9.8 | 6.5 |

Ключевым фактором пространственного распределения пигментов в ДО считается гидродинамическая активность. Влияние гидродинамики на растительные пигменты связано, вероятно, с обогащением (при перемешивании вод) поверхностных отложений кислородом [27]. Сходный характер распределения концентрации пигментов по отношению к проточности был отмечен у

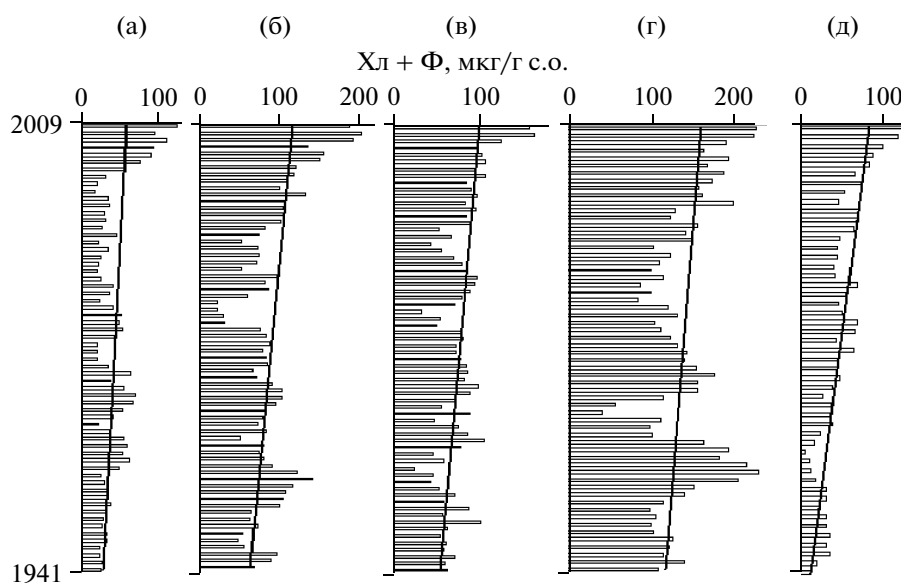


Рис. 2. Вертикальное распределение осадочных пигментов на станциях Рыбинского водохранилища. По горизонтали – сумма хлорофилл “а” с феопигментами (Хл + Ф), мкг/г сухого осадка (с.о.). По вертикали – число слоев в кернах с 1941 по 2009 г. а–д – станции 1–5. Прямые линии – линии тренда.

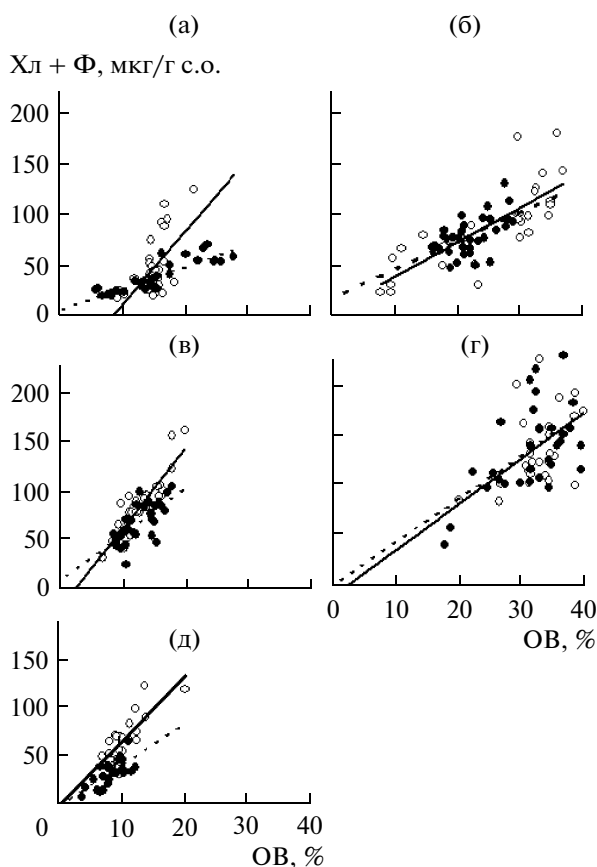


Рис. 3. Зависимость концентрации растительных пигментов (Хл + Ф) от содержания ОВ в верхней и нижней половинах керна. Черные точки и пунктир — нижняя часть колонки, светлые кружки и сплошная линия — верхняя часть колонки. Коэффициенты детерминации (R^2) для прямой связи пигментов с ОВ: 0.38 и 0.76 (а), 0.62 и 0.30 (б), 0.77 и 0.48 (в), 0.31 и 0.32 (г), 0.68 и 0.48 (д) соответственно.

разнотипных озер и водохранилищ [11, 12, 14, 28], водоемов и водотоков [2]. В Рыбинском водохранилище эта закономерность проявляется в том, что содержание пигментов в кернах озеровидных участков больше, чем в речных. В то же время варьирование концентраций сильнее выражено на проточных речных станциях. Так, концентрации растительных пигментов на речной волжской ст. 1 составили 44.1 ± 2.9 , речной шекснинской ст. 5 — 48.7 ± 3.7 , озеровидной ст. 3 — 76.7 ± 3 , экотонной ст. 2 — 90 ± 4.2 , озеровидной ст. 4 — 140 ± 5.4 мкг/г с.о. Коэффициенты вариации концентрации пигментов на речных станциях 1 и 5 — 52 и 53%, на остальных (озеровидных) — 30–38%. Следовательно, роль гидродинамической активности как фактора распределения пигментов — универсальная, поскольку она выявляется как в отдельном водоеме, так и в разнотипных водных объектах.

Связь содержания пигментов с типом грунта — тоже следствие влияния гидродинамической активности. Среднее содержание пигментов в колонках возрастает в ряду: песчанистый ил — глинистый ил — торфогенный ил (табл. 1–3; рис. 2). В предыдущих исследованиях на верхневолжских водохранилищах максимально высокие концентрации пигментов были получены тоже для торфогенных илов в верхнем слое отложений (0–2.5 см) [13, 15, 18]. Если учесть, что в торфогенных илах водохранилища коэффициент варьирования концентраций осадочных пигментов заметно меньше, чем в песчанистых и глинистых илах, то можно предположить, что характер стратиграфии пигментов в торфогенных илах более сходен с многолетней динамикой продуктивности планктона.

Показателем связи стратиграфии растительных пигментов с продуктивностью фитопланктона можно считать определенное соответствие типа вертикальной изменчивости ОП многолетней динамике хлорофилла в планктоне, а также некоторое согласование между концентрациями пигментов в воде и в ДО. В Рыбинском водохранилище для концентраций хлорофилла в планктоне чаще всего отмечаются значения мезо- и эвтрофных вод [8]. Однако характеристика концентраций пигментов в керне по трофическому признаку затруднена, поскольку универсальной шкалы трофности по этому показателю не существует. Если воспользоваться градацией, установленной для вулканических озер Германии [24] (в олиго-, мезо-, эв- и гипертрофных озерах концентрации ОП составили 13, 13–60, 60–120, >120 мкг/г с. о. соответственно), то Рыбинскому водохранилищу свойственны все уровни трофии — от олиго- до гипертрофного. В то же время средние величины, указанные выше для колонок, не включают значения, установленные для олиготрофных водоемов, и характеризуют трофический статус на станциях 1 и 5 как мезотрофный, станциях 2 и 3 — эвтрофный и ст. 4 — гипертрофный. Гистограмма распределения исходных данных для всех слоев по приведенной выше трофической шкале показывает, что преобладают величины, соответствующие мезо- и эвтрофным статусам водоемов (рис. 4), как и в водной толще.

Концентрация ОП и скорость илонакопления не входят в число обязательных критериев, используемых при оценке трофического состояния водоемов. Однако как интегральные показатели продукционно-деструкционных процессов они тесно связаны с биотическими и абиотическими факторами формирования продуктивности водных экосистем и имеют отношение не только к первичной, но и к конечной продукции водоема.

Вместе с тем оценка количественной связи между растительными пигментами в ДО и трофическим состоянием водохранилища затруднена из-за сильной вариабельности параметров. Полученные авторами статьи результаты показали, что стратиграфия ОП в разнотипных ДО Рыбинского водохранилища отражает характерную для осадконакопления неоднородность — пространственную и временную, обусловленную процессами формирования грунтового комплекса. Исследуемые керны четко различаются по типологическим характеристикам грунта (физико-химическим свойствам, гранулометрии) и по пигментным показателям (содержанию, коэффициенту варьирования, градиенту изменчивости по вертикали — во времени). Максимальное среднее значение (при минимальном варьировании) отмечено для колонки торфогенного ила (ст. 4). Наибольший коэффициент варьирования концентраций характерен для речных (наиболее проточных) участков — станций 1 и 5. Наибольший градиент концентраций по вертикали керна (от заполнения водохранилища) свойственен ст. 5 (в зоне влияния г. Череповца).

Доказательством существования связи между растительными пигментами в ДО, скоростью илонакопления и продуктивностью фитопланктона считалось сходство характера изменчивости и концентраций ОП и планктонного хлорофилла. Во-первых, циклический характер распределения растительных пигментов по вертикальному профилю ДО за период эксплуатации водохранилища имеет сходство с многолетней динамикой среднегодовых концентраций хлорофилла “а” в планктоне Главного плеса Рыбинского водохранилища [9]. Во-вторых, как и в планктоне, концентрации ОП относятся ко всей трофической шкале, но преобладают величины мезо- и эвтрофного статуса водоемов. В-третьих, концентрации растительных пигментов в ДО озеровидного Главного плеса, как и в планктоне, характеризуются более высокими значениями, чем в речном Волжском.

Показатели осадкообразования и продуктивности водоемов изменяются не всегда синхронно. Например, скорость седиментации, оцененная по численности створок диатомовых водорослей, в высокопродуктивном озере больше, чем в низкопродуктивном [29]. В водохранилище в маловодный год было отмечено высокое содержание первичной продукции фитопланктона и низкое — ОП в ДО [6, 9]. По данным авторов, в Рыбинском водохранилище изменения концентрации ОП и скорости илонакопления по вертикальному профилю керна характеризуются разнонаправленными

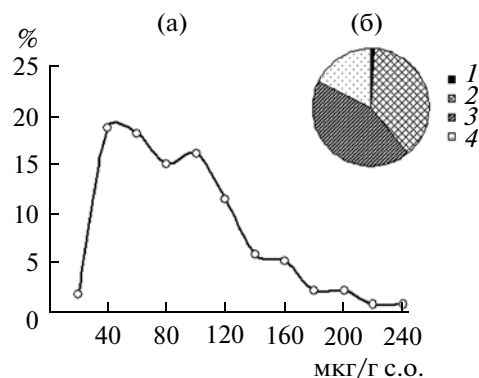


Рис. 4. Гистограмма распределения концентраций осадочных пигментов. а — частота встречаемости (доля, %, в общем числе данных) концентраций в различных диапазонах величин; б — соотношение численных данных, соответствующих концентрациям пигментов в олиго- (1), мезо- (2), эв- (3) и гипертрофных (4) водоемах.

трендами: от заполнения до периода исследования содержание пигментов (в расчете на сухой осадок) увеличивается, а скорость илонакопления — уменьшается (табл. 1, 2; рис. 2). Однако между среднегодовыми величинами содержания ОП и скоростью илонакопления установлена прямая положительная зависимость (рис. 5). При этом в кернах озеровидных участков содержание пигментов больше, чем в кернах речных. Исходные данные для построения этой зависимости показывают, что среднегодовое содержание пигментов уменьшается синхронно со скоростью илонакопления от съемки к съемке (рис. 6; табл. 1).

Среднегодовая концентрация ОП в кернах на станциях 1–5 для 1941–1955 гг. составила 525.4, для 1955–1978 гг. — 248.8, для 1978–1992 гг. — 200.6, для 1992–2009 гг. — 142.3 мг/(м²год). Примечательно, что значение этого же показателя для 1996–1998 гг. — 181.4 мг/(м²год) (рассчитанное для широкой сетки станций с аналогичными по содержанию ОП отложениями по результатам выполненных ранее исследований [13]) занимает промежуточное положение между величинами, полученными в настоящей работе для периодов между грунтовыми съемками II–III и III–IV. Эти результаты можно рассматривать как признаки снижения продуктивности водохранилища к настоящему времени. Об этом также свидетельствует увеличение площади песчаных отложений в Рыбинском водохранилище, отмечаемое по данным мониторинга ДО [5]. Однако концентрация ОП в первый (наименее исследованный) период наблюдений представляется несколько завышенной, что, по-видимому, связано с происхождением растительных пигментов из наземной раститель-

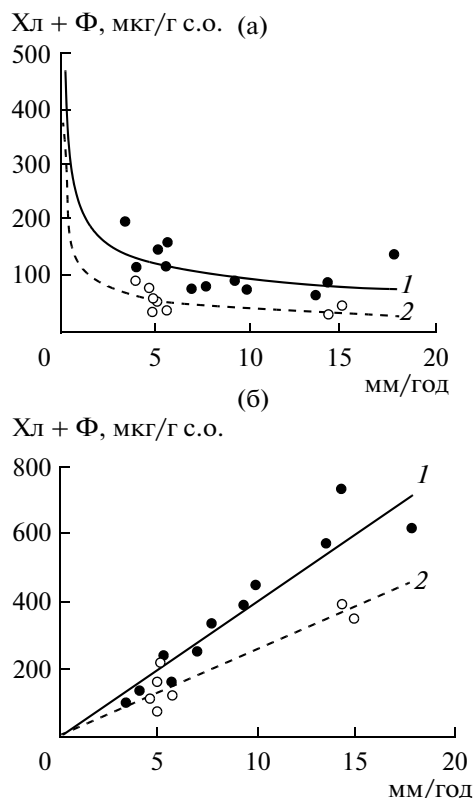


Рис. 5. Зависимость концентрации осадочных пигментов в кернах от скорости илонакопления на озеровидных (1) и речных (2) участках Рыбинского водохранилища. а – зависимость концентрации пигментов в сухом осадке от скорости илонакопления; уравнения связи для озеровидных станций: $y = 227x^{-0.38}$, $R^2 = 0.30$, $P < 0.05$; для речных: $y = 124x^{-0.5}$, $R^2 = 0.40$, $P < 0.05$. б – зависимость среднегодовой концентрации пигментов от скорости илонакопления; уравнения связи для озеровидных станций: $y = 39.8x$, $R^2 = 0.89$, $P < 0.05$; для речных: $y = 25.4x$, $R^2 = 0.84$, $P < 0.05$.

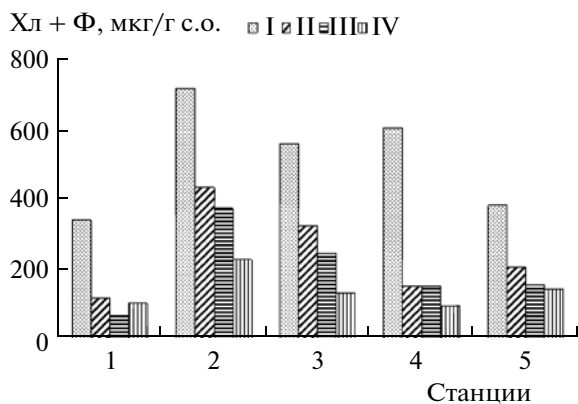


Рис. 6. Динамика среднегодового содержания растительных пигментов в кернах по станциям 1–5. I–IV – номера грунтовых съемок.

ности, оказавшейся под водой “в ловушке” после заполнения водохранилища. Признаки деэвтрофирования водохранилища в начале XXI в. отмечались также по хлорофиллу фитопланктона [11].

ВЫВОДЫ

Получены доказательства существования количественной связи между концентрациями осадочных пигментов, скоростью илонакопления и трофическим состоянием в крупном неглубоком равнинном водохранилище, характеризующемся сложной морфометрией, мозаичной структурой грунтового комплекса, неоднородностью гидродинамических процессов и тесным взаимодействием в системе “вода–ДО”. Показана индикаторная роль растительных пигментов в раскрытии механизма, обеспечивающего связь процессов осадкообразования и первичной продукции. Результаты исследования в Рыбинском водохранилище согласуются с известными в гидробиологии и лимнологии закономерностями и дают основание применять стратиграфический метод изучения растительных пигментов в ДО для мониторинга основного показателя трофии – продуктивности фитопланктона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 159 с.
2. Верниченко-Цветков Д.Ю. Растительные пигменты и ферментативная активность в донных отложениях разнотипных водных объектов. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Киев: Ин-т гидробиологии НАН, 2010. 22 с.
3. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
4. Законнов В.В. Аккумуляция биогенных элементов в донных отложениях водохранилищ Волги // Органическое вещество донных отложений волжских водохранилищ СПб.: Гидрометеоздат, 1993. С. 3–16.
5. Законнов В.В. Осадкообразование в водохранилищах волжского каскада. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: ИГ РАН, 2007. 42 с.
6. Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И., Законнов В.В. Стратификация горизонтов в донных осадках Рыбинского водохранилища // Вод. ресурсы. 2002. Т. 29. № 5. С. 552–555.
7. Мартынова М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука, 2010. 234 с.
8. Минеева Н.М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М.: Наука, 2004. 156 с.

9. *Пырина И.Л., Литвинов А.С., Кучай Л.А. и др.* Многолетние изменения первичной продукции фитопланктона Рыбинского водохранилища в связи с действием климатических факторов // Состояние и проблемы продукционной гидробиологии. М.: КМК, 2006. С. 36–46.
10. *Россолимо Л.Л.* Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 144 с.
11. *Сигарева Л.Е.* Формирование и трансформация фонда растительных пигментов в водоемах верхне-волжского бассейна. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: МГУ, 2006. 47 с.
12. *Сигарева Л.Е.* Содержание хлорофилла в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища // Биология внутренних вод. 2010. № 3. С. 38–46.
13. *Сигарева 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.
14. *Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А., Законнов В.В.* Сравнительный анализ содержания растительных пигментов в донных отложениях Горьковского и Чебоксарского водохранилищ // Поволжский экол. журн. 2010. № 3. С. 313–322.
15. *Сигарева Л.Е., Шаранова Н.А.* Растительные пигменты как показатели экологического состояния водных экосистем. Пигменты в донных отложениях // Современная экологическая ситуация в Рыбинском и Горьковском водохранилищах: состояние биологических сообществ и перспективы рыбохозяйственного развития. Ярославль: ЯГТУ, 2000. С. 83–100.
16. *Страхов Н.М., Бродская Н.Г., Князева Л.М. и др.* Образование осадков в современных водоемах. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 791 с.
17. *Эдельштейн К.К.* Водохранилища России: экологические проблемы и пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
18. Экологические проблемы Верхней Волги. Ярославль: ЯГТУ, 2001. 427 с.
19. *Adams M. S., Prentki R. T.* Sedimentary pigments as an index of the trophic status of Lake Mead // Hydrobiologia. 1986. V. 143. P. 71–77.
20. Eutrophication of waters: Monitoring, assessment and control. Paris: OECD, 1982. 155 p.
21. *Kowalewska G.* Algal pigments in Baltic sediments as markers of ecosystem and climate changes // Climate Research. 2001. V. 18. № 1–2. P. 89–96.
22. *Leavitt P.R.* A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance // J. Paleolimnol. 1993. № 9. P. 109–127.
23. *Lorenzen C.J.* Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations // Limnol., Oceanogr. 1967. V. 12. № 2. P. 343–346.
24. *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. V. 143. P. 327–329.
25. *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. V. 95. P. 283–302.
26. *Sanger J.E.* Fossil pigments in paleoecology and paleolimnology // Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology. 1988. V. 62. P. 343–359.
27. *Sun M.Y., Lee C., Aller R.C.* Anoxic and oxic degradation of C¹⁴-labeled chloropigments and a C¹⁴-labeled diatom in Long Island Sound sediments // Limnol. Oceanogr. 1993. V. 38. № 7. P. 1438–1451.
28. *Swain E.B.* Measurement and interpretation of sedimentary pigments // Freshwater Biol. 1985. V. 15. P. 53–75.
29. *Trifonova I.S., Davydova N.N.* Diatoms in plankton and sediments of two lakes of different trophic type // Hydrobiologia. 1983. V. 103. P. 265–268.