

СЕДИМЕНТАЦИЯ ВЗВЕСЕЙ В МОЖАЙСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ¹

© 2011 г. Е. Р. Кременецкая*, Д. В. Ломова*, Д. И. Соколов**, К. К. Эдельштейн**

*Институт водных проблем Российской академии наук
119333 Москва, ул. Губкина, 3

**Московский государственный университет
119991 Москва ГСП-1, Ленинские горы

Поступила в редакцию 14.01.2010 г.

Экспериментальными наблюдениями на Можайском водохранилище определены величины седиментационных потоков взвеси в летний период. Выявлены ведущие факторы формирования и скорости накопления в нем осадочного материала и органического вещества в различные фазы синоптического цикла на русловом и мелководных участках дна центрального района водоема.

Ключевые слова: седиментация взвесей, водохранилище, стратификация.

Содержание органического вещества (ОВ) в воде природных водоемов — один из наиболее важных показателей качества воды. Образование, трансформация, распад и минерализация ОВ сопровождаются существенными изменениями химического состава природных вод. Образованное в результате фотосинтеза фитопланктона автохтонное ОВ или попавшее в водоем аллохтонное ОВ, частично минерализуясь в водной толще, поступает в донные отложения (ДО) водоемов, где продолжает окисляться. Основные факторы, влияющие на количественные характеристики потоков взвешенного вещества — поступление взвесей с речным и склоновым стоком, абразия берегов, продукционно-деструкционные процессы, волновое взмучивание ДО, изменчивость течений, термо- и пикноклин, глубина водоема, сезонность и синоптическая изменчивость процессов трансформации в мелководных зонах и в трофическом слое периодически стратифицированной глубоководной части водоемов [6, 19].

Изучению седиментационных потоков в водоемах (морях, озерах) посвящено большое количество исследований. Водоохранилища долинного типа имеют свои морфологические особенности [18]: сильно вытянутая в плане акватория с извилистой береговой линией; асимметрия продольного профиля, проявляющаяся в увеличении глубин от верховьев к плотине; сложная структура ложа, состоящая из двух отрицательных форм рельефа — участка затопленной долины со сравнительно широким дном, сопрягающимся со склонами бортов, и врезанной в него более извилистой русловой ложбиной. Кроме того, в водохранилищах обычны значи-

тельные колебания уровня воды как внутри года, так и межгодовые, что сильно влияет на формирование, распределение и накопление ДО [9].

Цель данной работы — выявить ведущие факторы формирования седиментационных потоков в водохранилище долинного типа.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОЕМА

В качестве объекта исследований было выбрано Можайское водохранилище, которое относится к относительно глубоководным водоемам долинного типа с четко выраженной продольной асимметрией ложа. Кроме того, в нем наблюдается стратификация водной толщи на протяжении большей части летнего периода, свойственная глубоководным водохранилищам со слабым водообменом.

Можайское водохранилище, созданное в 1960 г., расположено на прямолинейном участке долины р. Москвы в 62 км от ее истока. Протяженность водохранилища 28 км, площадь при НПУ 30.7 км², объем 0.24 км³, максимальная глубина 22, средняя — 8 м, максимальная ширина 2.6, средняя — 1.1 км. Средний размах колебаний уровня воды в течение годового цикла — 6 м, средний годовой коэффициент условного водообмена Можайского водохранилища равен 1.8 год⁻¹ [15]. Большую часть года скорости стоковых течений ниже чувствительности гидromетрических приборов (1–2 см/с). Исключение составляет район выклинивания подпора, где может наблюдаться скорость течения до 30 см/с. Скорость плотностного придонного потока в летний период может достигать 12 см/с [17].

Основные источники взвешенного вещества в Можайском водохранилище — приток взвеси с водами рек Москвы и Лусянки, размыв берегов (об-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 09-05-00029 и 09-05-00657-а).

шая протяженность абразионных участков составляет 20% длины береговой линии), продукция фитопланктона [15]. На мелководных участках возможно ветро-волновое взмучивание ДО.

Содержание и распределение взвеси в Можайском водохранилище в летний период изменяется в зависимости от гидрологических условий. В верховьях во время дождей происходит увеличение концентрации взвешенного вещества (ВВ) до 10–25 мг/л при поступлении вод паводка [15]. При прохождении паводков в верховье водохранилища наблюдался [17] нефелоидный слой высотой 2–4 м с содержанием ВВ в нем >22, а у дна – до 36–50 мг/л.

В среднем по водохранилищу в летний период концентрация ВВ составляет 3–9 мг/л. Во время всплеск цветения синезеленых водорослей (обычно в августе) количество взвесей в воде увеличивается до 20–25, а в поверхностном слое – до 40 мг/л. При этом возрастает доля в них ОВ до 70–90% [15]. Кроме того, выдвинуто предположение [16], что при переносе взвеси придонным плотностным потоком из верховьев вдоль водохранилища возможны “выбросы” взвесей в вышележащие слои воды вследствие волновых флуктуаций нестационарного стратифицированного течения. А во время штормового взмучивания, как показали наблюдения [12], перемещение размытого материала за пределы мелководий происходит в виде двух потоков, разнонасыщенных взвешенным материалом. Первый поток состоит из “облака мутности”, которое перемещается у границы раздела дрейфового и компенсационного течений. Второй, более насыщенный взвесью поток движется вблизи дна, образуя нефелоидный слой. Таким образом, во время шторма перераспределение взвеси происходит в основном в пределах расширенных плесов под влиянием ветровой сгонно-нагонной циркуляции вод.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение седиментационных потоков проводилось летом 2008 г. в пределах Красновидовского плеса в центральном районе Можайского водохранилища. Седиментометры устанавливались на дно в русловой ложбине р. Москвы (ее глубина из-за сработки воды Можайским гидроузлом уменьшалась от 11.7 м в начале лета до 8.5 м уже к концу июня), на затопленных участках поймы ($h = 5.5–4.5$ м) и на склоне надпойменной террасы ($h = 3.5–3.2$ м). За время эксперимента было произведено 10 серий постановок ($n = 10$) в русловой ложбине и 8 серий ($n = 8$) на мелководных участках. Сроки экспозиции приборов составляли от 2 до 20 сут.

При обработке осадка в трех цилиндрических стаканах каждого прибора (диаметр цилиндра 10 см, высота 50 см) получены величины седиментационных потоков и содержание в осадке ОВ (по потере

веса при прокаливании [1]). Диаметр цилиндра и его соотношение с высотой удовлетворяет требованию к конструкции седиментометров, а длительность экспозиции соответствует рекомендованным срокам экспонирования [5, 8].

Одновременно с экспозицией седиментометров на рейдовой станции, расположенной в центре Красновидовского плеса над русловой ложбиной, проводились ежедневные 6-срочные наблюдения за направлением и скоростью ветра, облачностью, температурой воздуха и воды, содержанием в воде в полуденные часы растворенного кислорода и их изменением от поверхности воды до дна. С 26 июня также отбирались пробы поверхностной и придонной воды, в которых фильтрованием через мембранные фильтры (размер пор 0.45 мкм) определялась концентрация ВВ. В конце июня – начале июля производилась постановка продукционно-деструкционных станций скляночным методом (на четырех горизонтах) в кислородной модификации [4]. Пересчет валовой первичной продукции (ПП_{вал}) на единицы органического углерода $C_{орг}$ осуществлялся при помощи переходного коэффициента 0.375 [3]. На станциях в плесе отбирались пробы ДО (4 раза за лето) для определения его гигроскопической влажности и содержания в нем ОВ [1]. Гигроскопическая влажность грунта, определяемая по разности воздушно-сухого и абсолютно сухого весов, отражает дисперсность минеральной основы (наличие влаги в клетках органики) – “свежесть” исследуемых ДО [7].

При анализе результатов полевого эксперимента использованы данные гидролого-гидрохимических и гидробиологических съемок Можайского водохранилища в июне–июле 2008 г., выполненных сотрудниками и студентами-практикантами Красновидовской учебно-научной станции (УНС) географического факультета МГУ.

Кроме того, использовались данные о величине седиментационного потока ко дну на станции в русловой ложбине и сопутствующих характеристик водной толщи летом 1994 г. (материалы Красновидовской УНС, эксперимент “Взвесь-94”) и данные о седиментации, температурном и кислородном режиме летом 2007 г. При отсутствии измерений мутности поверхностного слоя воды ее значения восстанавливались по статистически значимой зависимости концентрации ВВ от величины прозрачности воды SD, построенной по данным многолетних наблюдений Красновидовской УНС

$$ВВ_{0.5 м} = 9.16SD^{-1.83}, \quad r^2 = 0.99, \quad n = 26.$$

СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ ВОДОХРАНИЛИЩА

В 2008 г. проводился ремонт Можайской и Колочской плотин, поэтому уровень воды в водохранилище летом был на 4–6.5 м ниже НПУ. В начале

июня глубина на русловой станции в Красновидовском плесе составляла 11 м (при НПУ она достигает 15 м), к началу июля она уменьшилась еще на 2.5 м и до конца наблюдений составляла 8.5 м. Пониженный уровень привел к тому, что прибрежная зона абразионного берега представляла собой аккумулятивную отмель, сложенную крупно- и среднезернистым песком, лишенным органических частиц грунта. Поэтому этим летом в воде плеса отсутствовала взвесь абразионного генезиса.

Температура поверхностного слоя воды летом 2008 г. увеличивалась от 14.5°C в начале июня до 22°C в конце августа, максимальное ее значение достигало 24°C. Придонный слой русловой ложбины прогревался за лето от 11 до 18°C.

К началу эксперимента водная толща водохранилища была стратифицирована. Термоклин находился в среднем в 5 м от дна русловой ложбины. Максимальный вертикальный градиент температуры воды в нем изменялся со сменой погоды от 0.8 до 2.4°C/м (рис. 1). Лишь во время похолодания в конце июня термоклин заглубился почти до дна.

Содержание растворенного кислорода в придонном горизонте (0.5 м над дном) русловой станции снизилось за 20 сут с 2.3 до 0.0 мг/л и не превышало 0.0–0.5 мг/л до конца эксперимента. Толщина слоя с концентрацией $O_2 < 1$ мг/л в среднем за лето составляла < 2 м. Низкое содержание O_2 в придонном горизонте сохранялось даже после шторма и похолодания, что, вероятно, связано с высокой активностью деструкции OB в илах русловой ложбины, а также с повышенным содержанием BB в придонной воде, поскольку увеличение количества взвеси увеличивает численность бактериопланктона [11]. На пойменной станции содержание O_2 у дна снижалось до 1.5 мг/л при усилении стратифицированности водной толщи и увеличивалось при разрушении стратификации.

В поверхностном слое содержание O_2 колебалось от 7.7 до 20 мг/л в зависимости от метеоусловий и температуры воды, влияющих на развитие фитопланктона. Концентрация $P_{\text{общ}}$ по данным Красновидовской УНС, в поверхностном горизонте в начале июня составляло 120 мкг/л, а в конце июня—начале июля ~ 50 мкг/л. Биомасса фитопланктона в поверхностном слое воды в конце июня—начале июля составляла 1.9–2.8 мг/л, преобладали синезеленые водоросли (83–89% общей численности фитопланктона). Значения $PP_{\text{вал}}$ в поверхностном слое в конце июня—начале июля составляли 0.35–0.57 мг $O/(л \cdot ч)$ или 0.11–0.21 мг $C_{\text{орг}}/(л \cdot ч)$. Отношение продукции OB к его деструкции в поверхностном слое варьировало от 3.6 до 7.6, а в столбе воды — от 0.5 до 2.8.

ДО в русловой ложбине представлены серым илом, а на затопленной правобережной пойме и склоне террасы — соответственно песчанистым

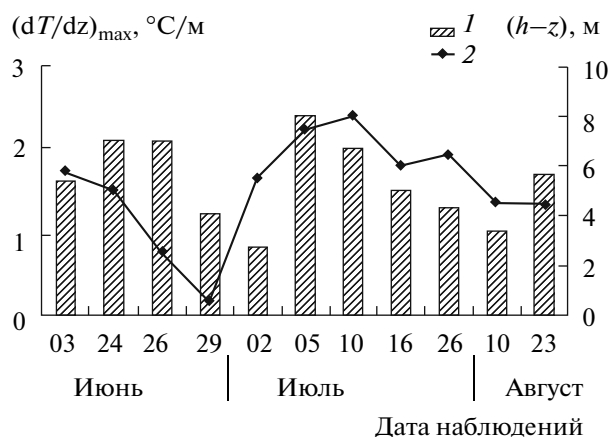


Рис. 1. Изменение величины максимального вертикального градиента температуры воды в термоклине, °C/м, 1 и расстояние от него до дна, м, 2 на русловой станции летом 2008 г.

илом и заиленным песком. На русловой станции гигроскопическая влажность проб грунта из верхнего 0–2-см слоя изменялась от 1.2 до 5.2%, содержание OB (потери веса при прокаливании) от 5.5 до 13.6, а на двух других станциях — от 0.8 до 4.3 и от 3.8 до 17.6% соответственно.

Лето 2008 г. было дождливым. За время эксперимента, продолжавшегося 81 сут, по данным Красновидовской УНС, выпало > 170 мм атмосферных осадков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В период двухмесячных наблюдений величина седиментации в русловой ложбине в центре плеса изменялась от 119 до 571 г/(м² сут), потока OB на дно — от 23 до 80 г/(м² сут) (таблица). Высокие величины седиментационного потока (СП) и потока OB в нем наблюдались в период похолодания и высокой ветровой активности (26–29 июня), что, по-видимому, связано с переносом взмученного вещества ДО с мелководий, сложенных заиленным песком. Переотложение ила подтверждается высокими концентрациями BB в придонной воде (в среднем 27 мг/л) в русловой ложбине, тогда как содержание BB в поверхностном слое воды была в среднем 11 мг/л.

Наибольшая величина СП = 571 г/(м² сут) отмечена 26 июля–10 августа, что, очевидно, связано с прохождением дождевого паводка (за 1 сут 5 августа выпало 22 мм атмосферных осадков). Также высокие величины потоков отмечены 05–10 июля и 16–26 июля, когда за время экспозиции седиментометров выпадало по 28 мм атмосферных осадков. Очевидно, в эти периоды был значителен горизонтальный (придонный) перенос поступившего в во-

Результаты эксперимента по определению потоков осадочного материала на седиментационных станциях в Красновидовском плесе Можайского водохранилища и ОВ в нем в июле 1994, 2007 и в июне–августе 2008 г. (про- черк – отсутствие данных)

Станция	Даты		Экспози- ция, сут	Глубина станции, м	Среднее содержание ВВ за экспозицию, мг/л		Средний вес осадка, г	ОВ, %	Поток, мг/(м ² сут)	
	постановки	съема			у поверхности	у дна			взвеси	ОВ
1994 г.										
1	04.07	18.07	14	13	7.4	4.7	–	14.0	75.7	10.6
2007 г.										
1	27.07	01.08	5	12.5	–	–	–	12.5	216.0	27.0
2008 г.										
В русле										
1	03.06	23.06	20.00	11.70	9.05*	–	18.9	23.2	131.25	30.5
2	24.06	26.06	1.73	9	10.6*	–	1.87	15.3	149.88	22.9
3	26.06	29.06	3.06	8.5	14.0	30.9	8.35	20.6	374.08	76.9
3	29.06	02.07	3.13	9	12.3	25.8	5.08	13.4	220.14	29.4
3	02.07	05.07	3.04	8.50	12.0	25.9	2.67	21.9	118.80	26.0
3	05.07	10.07	4.90	8.50	9.4	28.9	10.61	14.0	297.42	41.6
3	10.07	16.07	6.08	8.50	12.4	31.0	8.70	16.6	196.65	32.6
3	16.07	26.07	9.80	8.50	10.0	40.9	27.25	14.9	384.30	57.3
3	26.07	10.08	15.13	8.50	11.2	26.1	62.33	14.0	570.87	79.9
3	10.08	23.08	13.00	8.50	13.1	10.3	17.98	30.0	191.80	57.5
		среднее			11.4	27.5		18.4	263.52	45.47
На пойме										
4	26.06	29.06	3.2	5.5	19.2	26.7	1.58	17.4	66.33	11.5
4	29.06	02.07	3.05	4.5	14.1	26.5	2.25	10.9	96.35	10.5
4	02.07	05.07	3.10	4.5	8	9.1	1.36	17.3	58.76	10.2
4	05.07			4.50	8.4	4.6	–	–	–	–
4	11.07	16.07	6.15	4.50	7.3	12.6	2.58	15.1	57.21	8.6
4	16.07	26.07	9.80	4.50	2.2	9.0	4.17	14.7	58.49	8.6
4	26.07			4.50	14.5	7.8	–	–	–	–
4	10.08	23.08	12.16	4.50	18.2	8.0	6.29	33.0	71.45	23.6
		среднее			11.5	13.0		18.1	68.10	12.17
На склоне террасы										
5	26.06	29.06	3.06	3.5	19.9	16.4	1.69	12.7	73.16	9.3
5	29.06	02.07	3.08	3.2	14.5	8.7	1.15	11.3	49.41	5.6
5	02.07	05.07	3.08	3.2	9.3	6.7	0.72	15.3	30.56	4.7
5	05.07	10.07	4.90	3.70	5.5	11.1	3.22	11.3	90.59	10.2
5	10.07	16.07	6.13	3.5	10.6	13.3	3.04	12.2	67.74	8.3
5	16.07	26.07	9.80	3.5	11.0	7.6	14.78	14.5	208.94	30.3
5	26.07	10.08	15.13	3.5	7.7	5.1	19.12	10.9	175.40	19.1
5	10.08	23.08	13.00	3.5	9.1	6.7	9.36	24.0	99.70	23.9
		среднее			10.9	9.4		14.0	99.44	13.93

* – содержание ВВ в поверхностном слое воды рассчитано по величине относительной прозрачности воды (SD, м).

доем аллохтонного вещества с периферии плеса в русловую ложбину.

Если не рассматривать величины СП, формирующихся во время дождевых паводков, когда в водоем поступает аллохтонное ОВ, то на русловой станции скорость седиментации отрицательно связана с величиной максимального вертикального градиента температуры воды $(dT/dz)_{\max}$ (рис. 2). Корреляционное отношение степенной зависимости СП = $f(dT/dz)_{\max}$ $r^2 = 0.9$ при $n = 8$ (при этом $(dT/dz)_{\max} \geq 1^\circ\text{C}/\text{м}$). Для этих случаев прослеживалась положительная корреляция величины СП с концентрацией ВВ в верхнем слое воды ($r = 0.93$, $n = 8$), что указывает на преобладающую роль вертикальной составляющей СП – осаджения взвеси, содержание в которой автохтонного ОВ достигало 30%.

Ослабление стратификации летом происходило при прохождении циклонов, сопровождающихся высокой ветровой активностью. Увеличение содержания ВВ в поверхностном слое воды приводит к тому, что вместе с аллохтонной взвесью и взмученным веществом ДО мелководий соосаждается и новообразованное автохтонное ОВ. Это подтверждается, с одной стороны, тем, что отношение $\text{ПП}_{\text{вал}}$ к деструкции ОВ в поверхностном слое воды в 2008 г. было в среднем 5.7, в то время как в 1993–2000 гг. оно в среднем составляло 3.4 (3.2–3.8) [13]. При в ~1.5 раза более высокой продукции фитопланктона в 2008 г. (по сравнению с наиболее близким по высоте уровню воды, ее температуре и стратификации водной толщи маловодным 1996 г.) деструкция ОВ в толще воды была ниже на 20%. С другой стороны, с этим согласуется и более высокое содержание ОВ в грунте летом 2008 г., и большая дисперсность его минеральной основы по сравнению с 1993–2000 гг. [2].

Усиление же стратификации происходит при прогреве воды в безоблачную погоду со слабым ветром, и в это время осаждаются преимущественно автохтонное ВВ. В штилевую погоду формирование синоптического и дневного слоев скачка температуры уменьшает толщину перемешанного слоя. В этих условиях активно развиваются синезеленые водоросли, которые при цветении могут образовывать агрегаты. Внутриклеточные газовые вакуоли препятствуют седиментации, поддерживая агрегированное ОВ в верхнем слое воды до тех пор, пока конвективное перемешивание не “дизагрегирует” все цветение [20]. Таким образом, и в этом случае уменьшение устойчивости стратификации должно приводить к усилению СП.

В целом для русловой станции отмечена положительная корреляция величины СП с содержанием ВВ в придонной воде (корреляционное отношение экспоненциальной зависимости величины СП от мутности придонной воды $r^2 = 0.74$ при $n = 9$). Это, очевидно, связано с переносом взмученных иловых отложений или поступившего с боковым

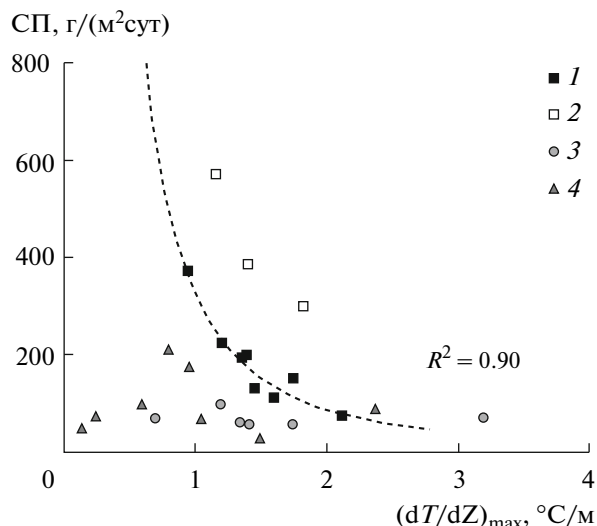


Рис. 2. Изменения СП в ДО Красновидовского плеса Можайского водохранилища в зависимости от максимального градиента температур. 1 – русловые станции 1–3; 2 – русло после паводка; 3, 4 – пойма (станции 4, 5 соответственно).

притоком аллохтонного ВВ с периферии плеса к его центру в русловую ложбину.

На менее глубоких станциях 4 и 5 величины СП и потока ОВ были существенно меньше, чем на русловой: в среднем 86 и 13 $\text{г}/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$ соответственно (таблица). Концентрация ВВ на обеих станциях в среднем составляла 11.5 $\text{мг}/\text{л}$. При этом на самой мелководной станции, расположенной у правого отмелого берега, при $T_{\text{пов}} < 24^\circ\text{C}$ имеется тенденция положительной корреляции (экспоненциальный $r^2 = 0.65$ при $n = 7$) величины СП с количеством атмосферных осадков, выпавших за время экспозиции, что, возможно, объясняется смывом дополнительного ВВ склоновым стоком. Максимальная величина потока ОВ на ст. 5 отмечалась при высокой температуре поверхности воды (в среднем 24°C), когда, по-видимому, создались оптимальные условия для развития доминирующих в этот период синезеленых водорослей. В целом для этой станции отмечается положительная корреляция величины потока ОВ ко дну со средней за время экспозиции седиментометром температурой поверхности воды мелководий, рассчитанной по ежедневным ее измерениям на водомерном посту Красновидово ($r = 0.76$ при $n = 8$).

Для пойменной ст. 4, расположенной ближе к затопленному руслу, получена также положительная корреляция потока осадочного материала с концентрацией ВВ в придонной воде ($r = 0.9$ при $n = 6$) и также прослеживается тенденция прямой зависимости СП от средней за период экспозиции интенсивности выпадения атмосферных осадков ($r = 0.82$, $n = 6$). Величина потока ОВ положительно

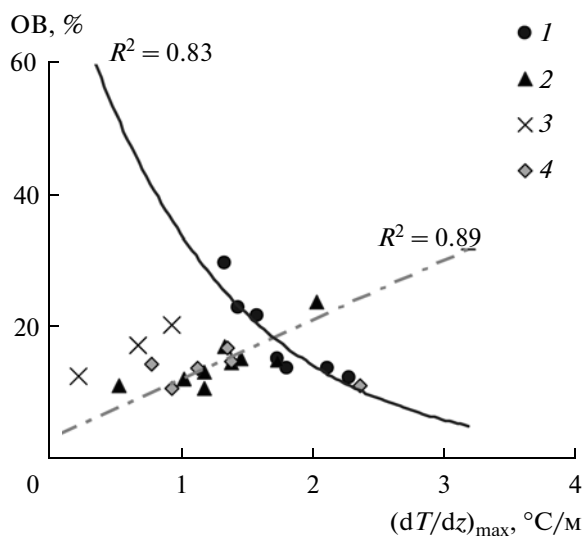


Рис. 3. Изменение доли ОВ, %, в осадке седиментометров летом 2008 г. в зависимости от максимального вертикального градиента температуры. 1 – русловые станции, 2 – мелководные станции 4 и 5; 3, 4 – станции 3–5 после шторма и паводка соответственно.

связана с $(dT/dz)_{\max}$ ($r = 0.83$, $n = 6$) и с содержанием ВВ в поверхностном слое воды (экспоненциальный $r^2 = 0.68$, $n = 6$).

На рис. 3 представлены зависимости изменения доли ОВ в осадке седиментометров от максимального вертикального градиента температур на русловых и внерусловых станциях. Водная толща на внерусловых станциях с небольшими глубинами чаще перемешана до дна. Даже в штилевую антициклоническую погоду водная толща на этих станциях может перемешиваться до дна при ночной конвекции. Наличие термоклина в дневное время способствовало развитию доминировавших синезеленых водорослей. Поэтому на внерусловых станциях отмечается положительная корреляция содержания ОВ в осадке седиментометров с устойчивостью термоклина. На русловых станциях, в отличие от пойменных, летом в Можайском водохранилище практически всегда присутствует хотя бы сезонный термоклин (в 2008 г. отмечен лишь 2-сут период, когда он опустился почти до дна). Наличие сезонного слоя скачка плотности на русловых станциях приводит к тому, что на его верхней границе оседающее ОВ задерживается и разлагается. Причем, чем сильнее перепад температуры (и плотности) воды, тем медленнее осаждаются ОВ и меньшее его количество достигает дна (отсюда отрицательная корреляция между содержанием ОВ в осадке седиментометров и максимальным температурным градиентом). В отдельные две группы на рис. 4 выделены русловые и мелководные станции в паводки и штормы, после которых в Красновидовском плесе увеличилось количество аллохтонных ОВ (или взмученных ДО),

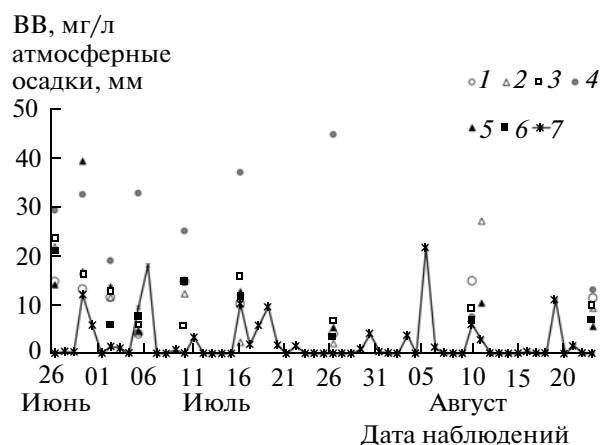


Рис. 4. Изменение содержания ВВ, мг/л, в поверхностном (над руслом 1, над поймой 2, над склоном террасы 3) и придонном (над руслом 4, над поймой 5, над склоном террасы 6) слоях воды и суточного количества атмосферных осадков, мм, по данным водомерного поста Красновидово 7.

из-за которых вклад автохтонного ОВ в седиментацию оказался невелик.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Если считать, что полученная для русловых станций при малом количестве атмосферных осадков корреляционная зависимость СП от $(dT/dz)_{\max}$ характеризует вертикальную составляющую СП автохтонного ВВ, то можно оценить величину этого потока в паводочный период (для построения зависимости при сходном значении $(dT/dz)_{\max}$ использовались наименьшие величины СП). Это представляется возможным, поскольку корреляционное отношение экспоненциальной зависимости восстановленного потока осаждающейся взвеси от концентрации ВВ в верхнем слое воды составило $r^2 = 0.61$ при $n = 11$. Полученные по зависимости СП = $f(dT/dz)_{\max}$ значения СП на русловой и пойменной станциях, за исключением пойменной станции с очень высокой концентрацией ВВ в придонном слое воды, связаны между собой ($r = 0.86$, $n = 5$).

По разности величин СП, измеренного во время прохождения паводков и рассчитанного по связи СП = $f(dT/dz)_{\max}$, оценена величина его горизонтальной составляющей в русловую ложбину, т.е. перенос ВВ придонными течениями с поймы в русловую ложбину. В период прохождения дождевых паводков вклад горизонтальной составляющей в общий СП достигал 57–67%. Полученная величина квазигоризонтального придонного потока в русло-

вую ложбину в 2008 г. статистически значимо связана с максимальной суточной интенсивностью атмосферных осадков за период экспозиции ($r = 0.79$, $n = 9$, не учитывался СП после шторма) и содержанием ВВ в придонном слое воды (экспоненциальный $r^2 = 0.68$, $n = 8$).

Сопоставление изменений концентрации ВВ на седиментационных станциях с суточным слоем атмосферных осадков (рис. 4) показывает, что увеличение содержания ВВ в придонном слое воды на русловой станции происходило в дождливые дни. При этом, вероятно, имела значение интенсивность дождя. Кратковременные ливни (как 5 июля) могут вызывать более значительное повышение концентрации ВВ, чем постепенное выпадение осадков в течение суток. Кроме того, увеличение содержания ВВ в придонном слое воды в русловой ложбине может быть связано и с прохождением паводка по водохранилищу. Повышенную концентрацию ВВ 26 июля можно связать с прохождением мутных вод паводка, начавшегося при длительном выпадении осадков 16–23 июля. В связи с необходимостью стабилизации уровня на низкой отметке, очевидно, был увеличен расход воды через глубинный водовод Можайского гидроузла, что привело к увеличению скоростей придонного плотностного течения в русловой ложбине [17] и увеличению его транспортирующей способности.

По значениям СП на участках с разной глубиной с помощью батиграфических кривых Можайского водохранилища был рассчитан суммарный поток ВВ на дно Красновидовского плеса. Средняя величина осадконакопления в этом плесе за два месяца (с 24 июня по 23 августа) составила 144 т/сут, а поток ОВ на дно – 23 т/сут (16%).

Оценка вклада ПП_{вал} в поток $S_{орг}$ со взвесью в ДО Красновидовского плеса выполнена по данным продукционно-деструкционной станции над русловой ложбиной с учетом того, что значения ПП_{вал} на мелководьях по данным Красновидовской УНС примерно вдвое больше, чем в глубоководных участках. Содержание $S_{орг}$ в осадке седиментомеров оценивалось по его известному отношению к потере веса при прокаливании [1, 10].

Казалось бы, при отсутствии абразии берегов поток $S_{орг}$ ко дну должен был бы определяться величиной ПП_{вал}, но, как видно на рис. 5, доля ПП_{вал} в потоке $S_{орг}$ в большинстве случаев <85%. Наименьший вклад (~30%) в поток $S_{орг}$ продукция фитопланктона вносила после прохождения шторма (26–29 июня). В остальное время доля ПП_{вал} в потоке $S_{орг}$ уменьшалась с увеличением интенсивности атмосферных осадков, увеличивающих поступление аллохтонного ОВ со склоновым стоком, доля

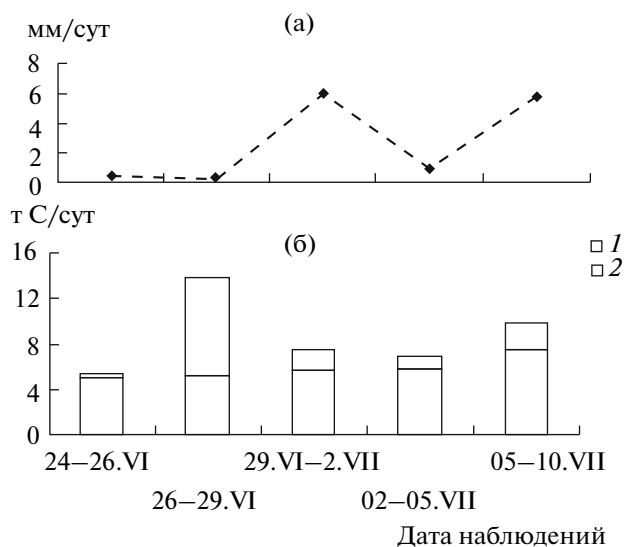


Рис. 5. Изменения средней за экспозицию интенсивности выпадения осадков (а) и потока $S_{орг}$ в ДО 1 и ПП_{вал} 2 (б) в Красновидовском плесе летом 2008 г.

которого достигала >25% общего потока ОВ ко дну (рис. 5).

Если не рассматривать поток ВВ на дно после шторма, суммарная величина СП в Красновидовском плесе положительно связана экспоненциальной зависимостью со слоем суточных атмосферных осадков ($r^2 = 0.73$ при $n = 9$). Это означает, что в циклоническую фазу синоптических циклов с ухудшением погоды ускоряется осадконакопление в длинном водохранилище. Сходные результаты были получены в Дальнезеленецкой губе Баренцева моря [14], где максимальный СП наблюдался в период наибольшего выпадения атмосферных осадков и при повышенной ветровой активности.

По зависимости объемной массы ДО от содержания в них ОВ, оцененного по потере веса при их прокаливании [10], был оценен объем осажденного ВВ и рассчитана толщина слоя осадков, отложившихся в Красновидовском плесе летом 2008 г. В русловой ложбине за первые 3 недели (3–24 июня) отложился слой в 1.0 см ила (т.е. увеличение толщины иловых ДО происходило со скоростью 0.33 см/неделю); за остальные два месяца (24 июня–23 августа) – 6.3, на пойме – 1.4, на склоне террасы – 2.1 см (скорости накопления ДО составили 0.74, 0.16 и 0.25 см/неделю соответственно). Содержание ОВ в пробах грунта на всех станциях положительно коррелирует с потоком ОВ в период, предшествующий отбору проб грунта ($r = 0.79$, при $n = 7$).

ВЫВОДЫ

На величину потока осадочного материала на дно долинного водохранилища и содержание ОВ во взвесах, осаждающихся в морфологически различных частях ложа, оказывают преобладающее влияние несколько факторов. Вблизи берега на величину СП влияют преимущественно ВВ, поступающие со склоновым стоком, на что указывает положительная связь величины седиментационного потока со слоем воды, выпавшей на побережье в дождливые дни. С удалением от берега влияние склонового стока снижается, большее значение приобретает концентрация ВВ в придонном слое, увеличение которой приводит к увеличению СП. На центральном участке плеса непосредственного влияния склонового стока не прослеживается. Основную роль в формировании потока осадочного материала здесь играет содержание ВВ в придонной воде, которое, однако, может быстро увеличиваться при выпадении ливневых осадков. При этом в наиболее глубокой части плеса выделяются две составляющие СП: вертикальная (на нее оказывает влияние стратификация) и горизонтальная (связанная с переносом взмученных на мелководьях и поступивших со склоновым стоком ВВ).

Поток ОВ вблизи мелководного берега зависит от температуры воды, повышение которой (в диапазоне 18–24°C) сопровождалось увеличением численности синезеленых водорослей. Связи потока ОВ с содержанием ВВ в поверхностном слое не прослеживается, по-видимому, из-за периодического повышения его в результате взмучивания ДО на мелководьях. На более глубокой пойменной станции, более удаленной от берега, поток ОВ зависит от содержания ВВ в поверхностном слое воды и от величины градиента температуры воды в термоклине. Увеличение устойчивости плотностного расслоения водной толщи на этой станции создавало благоприятные условия для накопления биомассы доминировавших синезеленых водорослей. В центре плеса над русловой ложбиной поток осаждающегося ОВ отрицательно связан с величиной максимального градиента температуры. Это объясняется практически постоянным наличием здесь сезонного термоклина (в отличие от внерусловых станций, водная толща которых в штилевую антициклоническую погоду еженощно перемешивалась конвекцией до дна), на верхней границе которого происходит активная минерализация осаждающегося ОВ.

В целом из-за морфометрических особенностей ложа долинного водохранилища величина СП на его дно в летний период при исключительно низком уровне воды обусловлена количеством атмосферных осадков, выпавших за 2-мес период экспериментальных седиментационных исследований. Доля аллохтонного ОВ, поступившего со склоновым стоком, может достигать 1/4 общего потока ОВ в ДО.

Авторы благодарны К.В. Романову и Е.К. Чупровой (фирма “Константа-Э”) за оперативное изготовление серии седиментометров в озерной и речной модификациях, использованных в экспериментах на Можайском водохранилище и реках Оке и Протве, и В.В. Пуклакову (УНС МГУ) за помощь в организации исследований и участие в них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М., Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
2. *Бреховских В.Ф., Вишневская Г.Н., Кременецкая Е.Р., Ломова Д.В.* Об оценке потребления кислорода разными типами грунтов долинных водохранилищ в летний период // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 10. С. 82–91.
3. *Бульон В.В.* Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах. СПб.: Наука, 1994. 220 с.
4. *Винберг Г.Г.* Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 66 с.
5. *Глуценко Л.О.* Методологические основы изучения седиментации в водоеме (обзор) // *Гидробиол. журн.* 1988. Т. 24. № 2. С. 68–76.
6. *Денисов В.И., Черноусов С.Я.* Потоки взвешенного вещества в области шельфа Черного моря (итоги 20-летних исследований) // *Матер. XVII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии*. М., 2007. Т. III. С. 23–25.
7. *Дзюбан А.Н.* Деструкция органического вещества в донных отложениях водохранилищ Волги // *Микробиологические и химические процессы деструкции органического вещества в водоемах*. Л.: Наука, 1979. С. 142–150.
8. *Дубовская О.П.* Методологические основы использования седиментационных ловушек в морских и континентальных водоемах (обзор) // *Гидробиол. журн.* 2002. Т. 38. № 5. С. 98–110.
9. *Законнов В.В.* Пространственно-временная неоднородность распределения и накопления донных отложений верхневолжских водохранилищ // *Вод. ресурсы*. 1995. Т. 22. № 3. С. 362–371.
10. *Законнов В.В.* Осадкообразование водохранилищ волжского каскада. Дис. ... докт. геогр. наук. Борок, ИБВВ РАН, 2007. 379 с.
11. *Иватин А.В.* Корреляции между общей численностью бактерий и количеством взвешенных веществ в воде Куйбышевского водохранилища // *Биология внутренних вод. Информ. бюлл.* Л.: Наука, 1975. № 26. С. 4–6.
12. *Карнаухова Г.А.* Процессы осадкообразования в водохранилищах ангарского каскада. Автореф. ... докт. геогр. наук. Иркутск, ИГ СО РАН, 2009. 42 с.
13. *Кременецкая Е.Р.* Гидрологические факторы формирования кислородного режима стратифицированного водохранилища. Дис. ... канд. геогр. наук. М.: ИВП РАН, 2001. 150 с.

14. Митяев М.В., Герасимова М.В., Дружкова Е.И. Вертикальные потоки осадочного вещества в губе Дальнезеленецкой Баренцева моря (июль—сентябрь 2006 г.) // Матер. XVII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. М., 2007. Т. III. С. 51—53.
15. Можайское водохранилище // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1979. Вып. 3. 400 с.
16. Самолубов Б.И. Придонные стратифицированные течения и транспорт взвеси в водохранилищах и озерах // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 4. С. 440—454.
17. Самолубов Б.И., Замарашкин А.Л., Шильнев А.В. и др. Распространение стратифицированных течений в равнинных водохранилищах // Вод. ресурсы. 2001. Т. 28. № 2. С. 141—147.
18. Эдельштейн К.К. Водные массы долинных водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1991. 179 с.
19. Хатчинсон Д. Лимнология. М.: Прогресс, 1969. 591 с.
20. Hietanen S. Literature review on microbiology of aggregates originating from phytoplankton blooms // Mery. 1988. № 37. P. 27—44.