

**ПРОГНОЗ ЗАИЛЕНИЯ И ЗАНЕСЕНИЯ
ВОРОНЕЖСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА
ПРОДУКТАМИ РАЗРУШЕНИЯ БЕРЕГОВ, ФИТОПЛАНКТОНА
И ВЫСШЕЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ**

В. М. Мишон

Воронежский государственный университет, Россия

Поступила в редакцию 10 июня 2009 г.

Аннотация: В статье рассматривается механизм заиления и осадконакопления. Образовавшийся начальный осадок в дальнейшем подвергается трансседиментации. На основании уравнения седиментационного баланса дается прогноз заиления и занесения водохранилища.

Ключевые слова: Осадконакопление, аллахотонные и автохтонные вещества, хемогенная седиментация, седиментационный баланс.

Abstract: The article discusses the mechanism of silting and sedimentation. The initial sediment is further subjected to transsedimentation. The forecast of reservoir sedimentation and pollution is based on the sediment balance equation.

Key words: sedimentation, allahotonous and autochthonous material, chemogenic sedimentation, sedimentation balance.

Воронежское водохранилище – водохранилище внутригородское. Помимо отложения наносов, приносимых вместе с речным стоком р. Воронеж и поступающих с прилегающих склонов, значительный объем осадков образуется в результате обрушения берегов и отмирания водной растительности и в самом водохранилище.

При осаждении речных наносов вследствие малых скоростей в пределах водохранилища происходит их сортировка: наиболее крупные наносы откладываются в его верхней части, более мелкие сносятся ниже, наиболее мелкие (ил) разносятся по всему ложу водохранилища [4].

Механизм заиления и осадкообразования

В общем виде механизм заиления и осадконакопления в водохранилище включает следующие процессы: 1) поступление седиментационного¹ материала с водосбора (*аллахотонное вещество*) и его образование в самом водохранилище (*автохтонное вещество*); 2) транспортирование взвесей

в водохранилище; 3) их переработку и сортировку; 4) осаждение и вынос из водохранилища; 5) преобразование донных отложений в осадочную породу.

С процессами интенсивной седиментации связаны явления заиления и заносимости водохранилища. В определенных условиях заиление и заносимость чаши искусственных водоемов характеризуется большой интенсивностью.

Автохтонное вещество образуется в результате береговой абразии, гравитационных процессов в береговой зоне, продуцирования гидробионтов и *хемогенной седиментации* (хемогенные отложения возникают в результате химических реакций, протекающих в водохранилище).

Размыв берегов, являющийся следствием ветрового влияния и зависящий от состава пород и морфологического строения берега, наиболее интенсивно протекал в первые годы существования водохранилища. Со временем интенсивность размыва берегов стала ослабевать, усиливаясь лишь в годы с повышенной ветровой активностью.

С созданием водохранилища в надводной части берегов интенсифицировались гравитационные процессы (обвалы, осыпи, оползни и т.д.), обус-

© Мишон В.М., 2010

¹ Седиментация – оседание наносов под действием силы тяжести и накопления органических и минеральных осадков.

ловленные, главным образом, волноприбойной деятельностью. Уменьшению прочности береговых пород способствовали их переменное смачивание, сопровождающееся химическим выветриванием.

Органическое вещество в водохранилище образуется в результате жизнедеятельности животных и растительных организмов. В верховье водохранилища (V гидрологический район) его основным источником является высшая водная растительность.

Общее количество седиментационного материала, поступившее в водохранилище из всех источников, уменьшается с увеличением продолжительности его эксплуатации. Соотношение между аллохтонным и автохтонным веществом, наоборот, увеличивается в процессе эксплуатации водохранилища [10].

Образовавшийся начальный осадок в дальнейшем подвергается трансседиментации (переотложению), чему способствует: 1) взмучивание ветровым волнением поверхностного слоя осадка в мелководной открытой части водохранилища; 2) сезонная изменчивость стокового течения; 3) сползание верхнего разжиженного слоя ила вниз по уклону и 4) впадающие в водохранилище овраги и балки, по которым выносятся песчаный материал из прибрежной зоны. В результате действия перечисленных факторов происходит выравнивание и нарастание подводного рельефа, нарушается годовая и сезонная слоистость отложений.

Через источники седиментационного материала осадконакопление связано с процессами, происходящими на водосборе и в водохранилище, и поэтому является сложным многофакторным нестационарным процессом. Интенсивность осадконакопления, с одной стороны, зависит от поступления аллохтонного и автохтонного вещества, а с другой – от наносоудерживающей способности водохранилища. Наносоудерживающая способность водохранилища оценивается по отношению количества отложившегося материала к общему поступлению седиментационного материала за тот же период.

Количественным выражением механизма заиления и осадкообразования в водохранилище является баланс вещества. Уравнение седиментационного баланса водохранилища имеет вид

$$R_{\Pi} + R_{\text{о}} + R_{\text{р}} + R_{\text{орг}} + R_{\text{хем}} = R_{\text{о}} + R_{\text{с}} + R_{\text{хоз}} \pm \Delta R_{\text{взв}} \pm \Delta R, \quad (1)$$

где R_{Π} и $R_{\text{о}}$ – приток наносов из р. Воронеж и с прилегающих склонов соответственно; $R_{\text{р}}$ – про-

дукты размыва берегов и начального ложа; $R_{\text{орг}}$ – продукты жизнедеятельности растительных и животных организмов; $R_{\text{хем}}$ – продукты хемогенной седиментации; $R_{\text{о}}$ – осадконакопление; $R_{\text{с}}$ – сброс взвесей в нижний бьеф гидроузла; $R_{\text{хоз}}$ – изъятие взвесей из водохранилища при заборе воды на хозяйственные нужды; $\Delta R_{\text{взв}}$ – изменение количества взвесей в водохранилище за расчетный период; ΔR – невязка баланса. Все элементы баланса вещества в уравнении (1) имеют размерность массы (кг). Основными составляющими приходной части баланса являются: приток наносов из р. Воронеж R_{Π} и с прилегающих склонов $R_{\text{о}}$, продукты размыва берегов и начального ложа $R_{\text{р}}$, продукты жизнедеятельности растительных организмов $R_{\text{орг}}$; расходной части – осадконакопление $R_{\text{о}}$.

Наносоудерживающая способность водохранилища зависит: 1) от интенсивности водообмена, показателем которого является отношение объема сбрасываемой воды из водохранилища к объему его водной массы за тот же период; 2) глубины; 3) очертания в плане и 4) объема поступления твердого материала. В зависимости от этих факторов наносоудерживающая способность водохранилища изменяется в широких пределах. Известны случаи почти полного заиления малых водохранилищ в течение 3-5 лет. Такая же судьба постигла и некоторые большие водохранилища. Штеровское водохранилище на р. Миус в Донбассе за первые пять лет эксплуатации заилено на 85%. Водохранилище Рионской ГЭС в Грузии за 10 лет эксплуатации заилено на 83% [8].

Детальный анализ изменения морфометрических характеристик Воронежского водохранилища за прошедшие 35 лет эксплуатации, выполненный в ОАО «Стройинвестиция» показал, что изменение этих характеристик вызвано не только заилением и занесением водохранилища, но и проведением гидромеханизированных работ по намыву песка для укрепления берегов, расширения площади подземных водозаборов и ликвидации мелководной, что особо необходимо в V гидрологическом районе, и т.д. [7].

Показателем интенсивности заиления водохранилища может служить отношение объема водохранилища W при НПП к годовому поступлению речных наносов R , выраженному в объемных величинах. Чем меньше это отношение, тем быстрее произойдет заиление. На основании наблюдений по значительному количеству водохранилищ Г.И. Шамовым [8] установлено, что количество отлагающихся в течение одного года наносов R , в

процентах от объема водохранилищ W , выражается величинами приведенными в таблице.

Следует отметить, что приведенные здесь сведения дают представление о долговечности службы водохранилищ (если известны их объем и годовой сток наносов) только в первом приближении.

Прогноз заиления и занесения водохранилища

Среднюю продолжительность службы Воронежского водохранилища оценим по формуле (2), основанной на учете основных слагаемых седиментационного баланса (1) и объема заиляемой части водохранилища при разных уровнях воды.

$$T = \frac{W}{(V_{\text{п}} + V_{\text{б}} + V_{\text{р}} + V_{\text{ра}} - V_{\text{с}} \pm V_{\text{гм}})}, \quad (2)$$

где T – продолжительность службы водохранилища в годах; W – объем водохранилища (м^3) до заиляемой или заносимой отметки; при НПП – предельный (или конечный) объем отложившихся наносов равен полному объему (м^3) водохранилища; $V_{\text{п}}$ – средний годовой объем речных наносов (м^3), поступивших в водохранилище; $V_{\text{б}}$ – объем наносов (м^3), поступивших в водохранилище за год с прилегающих склонов; $V_{\text{р}}$ – объем продуктов разрушения берегов (м^3) в среднем за год; $V_{\text{ра}}$ – объем за год осевших продуктов жизнедеятельности растительных организмов (м^3); $V_{\text{с}}$ – сброс твердого вещества (м^3) из водохранилища; $V_{\text{гм}}$ – объем гидромеханизированных работ (м^3).

Опыт эксплуатации больших и средних водохранилищ России и Мира показывает, что сроки возможного заиления крупных водохранилищ исчисляются сотнями, тысячами (Мингечаурское водохранилище на р. Кура) и даже десятками тысяч лет (Камское на р. Кама).

Для прогноза срока заиления и занесения Воронежского водохранилища необходимо количественно оценить все компоненты, входящие в формулу (2).

Твердый сток р. Воронеж. Из всех рек бассейна Дона р. Воронеж наименее мутная. Средняя

годовая мутность воды во входном створе Воронежского водохранилища равна 74 г/м^3 что, например, в 3,6 раза меньше мутности Дона у Задонска (270 г/м^3) и в 8,3 раза – р. Сосны у г. Ельца (620 г/м^3).

Суммарный модуль водной эрозии водосбора водохранилища характеризуется небольшой величиной всего $9,8 \text{ т/км}^2\cdot\text{год}$, что в 10 раз меньше аналогичного показателя для Сосны у г. Ельца и в 4 раза – Дона у г. Задонска. Средняя годовая величина слоя смыва в бассейне водохранилища, равная $0,0076 \text{ мм}$, значительно меньше, чем, например, в бассейне Дона до г. Задонска ($0,030 \text{ мм}$). Две последние цифры означает, что в среднем за год поверхность водосбора водохранилища понижается на $0,0076 \text{ мм}$, бассейна верхнего Дона – на $0,03 \text{ мм}$ [5].

Максимальные значения мутности относятся к периоду весеннего половодья и значительно превышают среднюю годовую величину, Так, у с. Сокольское 28 марта 1930 г. зарегистрирована наибольшая мутность 152 г/м^3 . В межень мутность резко уменьшается до $10\text{-}12 \text{ г/м}^3$. Формирование пика мутности происходит под влиянием местных вод, а не вод, пришедших издалека и успевших в пути потерять часть наносов. Небольшая мутность р. Воронеж объясняется слабым размывом русла реки, так как уклон водосбора небольшой и его поверхность покрыта растительностью, которая занимает значительную площадь водосбора. Кроме того, русло реки и ее берега предохраняет от размыва многочисленная высшая водная растительность. Уменьшают мутность воды и водоросли на дне реки, которые служат фильтрами, задерживающие наносы [5]. Расход взвешенных наносов р. Воронеж во входном створе водохранилища составляет $5,8 \text{ кг/с}$, расход влекомых наносов равен $0,5 \text{ кг/с}$. Годовой сток взвешенных наносов равен 190 тыс. т или 144 тыс. м^3 , влекомых наносов – 16 тыс. т или 12 тыс. м^3 [5]. Полный сток наносов реки (взвешенных и влекомых) – 206 тыс. т (156 тыс. м^3).

Таблица

Годичное отложение наносов в % от объема водохранилища (по Г.И. Шамову, [8])

W/R	Годичное отложение R/W 100%	W/R	Годичное отложение R/W 100%
1000 – 200	0,5	20 – 10	5,0 – 10,0
200 – 100	0,5 – 1,0	10 – 5	10,0 – 20,0
100 – 50	1,0 – 2,0	5 – 1	20,0 – 100
50 – 20	2,0 – 5,0	–	–

За 35 лет в верховье водохранилища вместе с речной водой р. Воронеж поступило 5,46 млн. м³ речных наносов. Если предположить, что все они осели в верховье водохранилища, т.е. в самой ценной в хозяйственном отношении части (на участке от железнодорожных мостов до с. Чертовицко-го), то объем осевших здесь наносов составляет 11,6% от современного объема участка или слой равномерно распределенных по площади наносов равен 0,22 м.

Суммарное количество наносов. Наносы в водохранилище поступают не только с речным стоком, но и с ливневыми и талыми снеговыми водами, в основном с урбанизированной территории. Кроме того, наносы образуются и в самом водохранилище при воздействии волн на подводные склоны ложа, а также в процессе переформирования берегов.

Суммарное количество взвешенных и влекомых (донных) наносов, которое поступает в водохранилище с речными и ливневыми водами с площади боковой приточности невелико – 6,4 кг/с, или 202 тыс. м³ в год. Основной объем твердого стока (более 80%) поступает весной, когда смыв с поверхности бассейна и размыв первичных русел достигает максимума. Наносы осаждаются в зоне выклинивания подпора вследствие уменьшения кинетической энергии потока. В верхней части водохранилища осаждаются более крупные, по акватории – более мелкие наносы [4]. Отложение крупных наносов (диаметром более 0,25 мм) происходит в виде широкой гряды, что характерно для водохранилищ руслового типа (в озеровидных водохранилищах они осаждаются в форме конуса выноса).

Мутность воды в водохранилище небольшая, она изменяется в зависимости от сезона года и характера подводного рельефа и составляет в среднем 8-44 г/м³. Самая большая мутность около 40 г/м³ наблюдается весной на участке от места выклинивания подпора до железнодорожных мостов. В черте города мутность воды уменьшается почти в 3 раза, так как значительная часть наносов осаждаются в верховье водохранилища [3].

Продукты фитопланктона и высшей водной растительности. Кроме материалов техногенного происхождения, поступающих с берегов и водосборной площади, в образовании донных отложений определенную роль играют различные органические остатки.

Непосредственных наблюдений за такими осадками на водохранилище не производилось и

поэтому их величину определим косвенным путем по литературным источникам [2].

Считается, что доля участия органических веществ в формировании донных отложений не превышает 2%. Причем около 80% запасов органики вносится притоками и только 20% образуются непосредственно в водоеме. Для водохранилищ лесной зоны в период их наполнения и в первые годы существования органическая часть отложений, как правило, больше минеральной. В последующие годы это соотношение изменяется в пользу минеральной части [9].

Продукты разрушения берегов. Натурные наблюдения в навигационный период, начатые с 1972 г., показали, что более интенсивно процесс формирования берегов протекает в нижней части водохранилища, на участке от плотины гидроузла до моста ВОГРЭС. С ноября 1972 г. по май 1976 г. береговая линия в районе с. Шилово ежегодно отступала от уреза воды на 0,7-0,8 м. Смещение береговой линии объясняется наличием здесь больших глубин и значительной длиной разгона ветра, что обуславливает формирование крупных, до 1,3 м высот волн. В результате волнового воздействия берега здесь, как и в других частях водохранилища, подвергаются абразионной переработке [1].

Расчет срока заиления и занесения водохранилища. Оценим с помощью формулы (2) время заиления водохранилища.

По данным ОАО «Стройинвестиция» современный объем водохранилища $W=199$ млн. м³ [7]. Средний годовой объем речных наносов, поступивших в водохранилище вместе со стоком р. Воронеж $V_n=156$ тыс. м³ [5]. Объем отложений за счет отмирания растений рекомендуется принимать [2] равным 2% от поступивших наносов, т.е. $V_{pa}=156 \cdot 0,02=3,12$ тыс. м³.

Непосредственных наблюдений за поступившими в водохранилище наносами в результате разрушения берегов нет. Поэтому определим их косвенным путем по литературным данным [2, 9]. Учитывая, что в Воронежском водохранилище уровень воды практически постоянен в течение всего года (за исключением отдельных экстремальных случаев) в качестве аналога для расчета объема продуктов обрушения берегов V_p возьмем Угличское водохранилище, где поступившие от обрушения и размыва берегов наносы в 1,5 раза превышают сток речных наносов [9], т.е. $V_p = V_n \cdot 1,5 = 234$ тыс. м³.

Наблюдений за наносами, поступающими с площади боковой приточности водохранилища,

включая территорию г. Воронежа, не производилось. Расчетное количество наносов с этой площади ($F=520 \text{ км}^2$) V_6 составило 46 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$. Сток наносов из водохранилища также не изучался. Однако, учитывая распределение взвешенных частиц различного диаметра по длине водохранилища [4], можно считать его значение близким к «0», т.е. $V_6=0$. Так же близки к «0» изъятие взвесей из водохранилища при заборе воды на хозяйственные нужды и изменение их в водохранилище за расчетный период, т.е. за год.

Кроме этого, за период существования водохранилища в его акватории проводились гидромеханизированные работы по замыву мелководий, укреплению берегов, намыву пляжей и т.д. Объем вынутаго и перемещенного грунта за это время составил 19,4 млн. м^3 или в среднем за год 554 тыс. м^3 .

С учетом имеющихся в нашем распоряжении более полных материалов наблюдений, литературных данных и более полных расчетов время заиления водохранилища составит:

$$T = \frac{199000 \cdot 10^3}{(156 + 3,12 + 234 + 46) \cdot 10^3} = 453 \text{ года}$$

Таким образом, с учетом сложившихся техногенной и антропогенной нагрузок, а также современных природно-климатических условий, можно сделать твердый вывод о том, что полное заиление Воронежского водохранилища произойдет не раньше, чем через 450 лет.

По иному подошел к проблеме заиления водохранилища Г.С. Пашнев [6]. Основываясь исключительно на поступлении в водохранилище наносов, приносимых р. Воронеж и не учитывая внутриводоемные процессы (обрушение берегов, перемещение в чашу водохранилища обрушенного материала; оседание на дне продуктов отмирания высшей водной растительности и т.д.) он пришел к выводу, что полное заиление водохранилища (именно заиление, а не заиление плюс занесение) произойдет через 1000 лет. Заиление водохранилища на 8-10% от его полного объема по расчетам Г.С. Пашнева произойдет соответственно через 50-100 лет [6].

Наибольшую практическую ценность представляет прогноз заиления и занесения водохранилища для его верхней части (V гидрологический район), где сосредоточены основные водозаборы, обеспечивающие население г. Воронежа питьевой водой. Если учесть, что в основном здесь откладываются все речные наносы, приносимые р. Воронеж и что акватория этой части водохрани-

лища практически полностью заросла высшей водной растительностью, то легко определить, что время ее полного заиления и занесения составит

$$T = \frac{40000 \cdot 10^3}{(156 + 234 + 46) \cdot 10^3} = 90 \text{ лет.}$$

Иными словами, до полного заиления и занесения этой зоны, с учетом уже просуществовавших лет осталось 45-50 лет. Учитывая, что основные водозаборы (Южно-Чертовичский, ВПС-11, ВПС-8) сосредоточены в верхней части этой зоны, то можно утверждать, что уже в ближайшие десятилетия акватория водохранилища в районе основных водозаборов перестанет существовать.

Поэтому для борьбы с прогрессирующим заилением верхней части водохранилища необходимо выполнить комплекс противоэрозионных мероприятий на прилегающей водосборной площади с одновременным проведением гидромеханизированных работ по защите берегов, очистке ложа водохранилища от донных отложений и ликвидации мелководий. Практическая ценность указанных работ в том числе и на продление срока службы водохранилища очевидна. Так, например, до строительства водохранилища, когда русло р. Воронеж прижималось к Лысой горе, происходил интенсивный размыв ее основания, сопровождавшийся значительными обвалами и осыпями. После намыва защитного песчаного откоса шириной до 50 м обвалы и осыпи прекратились и теперь Лысая гора полностью покрыта и защищена от разрушения древесно-кустарниковой растительностью.

Гидромеханизированные работы по замыву мелководной в этой части водохранилища включены в состав первоочередных мероприятий «Программы экологигиенической безопасности Воронежского водохранилища и р. Воронеж на период 2005-2015 гг.».

Необходимость проведения гидромеханизированных работ с целью продления срока службы водохранилища была заложена еще в первоначальном проекте подготовки ложа. В проекте на всем верхнем участке (выше железнодорожных мостов) предусматривалось снятие и перемещение поверхностного слоя с укладкой разрабатываемого грунта, тут же в отвалы, которые по проекту образовали бы цепь островов и тем самым увеличили бы минимальную глубину до 4 м. В итоге выполнения указанных работ площадь мелководий сократится с 19,7 км^2 до 16,7 км^2 (т.е. на 15%) и, главное, абразионные берега практически исчезнут.

Намытые территории станут своеобразным щитом на пути проникновения в водохранилище наносов, будут служить «буферной» зеленой зоной между городом и водохранилищем, образовав элемент природного ландшафта в виде открытых озелененных островов и водных пространств, что в конечном итоге продлит срок службы водохранилища [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колпачева М.П. Переформирование берегов водохранилища / М.П. Колпачева // Антропогенные ландшафты Центрально Черноземных областей и прилегающих территорий: материалы 2-ой регион. конф. – Воронеж, 1975. – С. 131-133.
2. Матарзин Ю.М. Гидрология водохранилищ / Ю.М. Матарзин. – Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2003. – 296 с.
3. Мишон В.М. Некоторые вопросы гидрологии Воронежского водохранилища / В.М. Мишон // Сб. работ по гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – № 18. – С. 103-119.

Мишон Виталий Михайлович
доктор географических наук, профессор кафедры природопользования Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. (4732) 66-56-54,
E-mail: root@geogr.vsu.ru, evm@yandex.ru

4. Мишон В.М. Наносы / В.М. Мишон [и др.] // Воронежское водохранилище: комплексное изучение, использование и охрана. – Воронеж, 1986. – С. 52-55.
5. Мишон В.М. Река Воронеж и ее бассейн: ресурсы и водно-экологические проблемы / В.М. Мишон. – Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 2000. – 296 с.
6. Пашнев Г.С. Прогноз заиления Воронежского водохранилища / Г.С. Пашнев // Антропогенные ландшафты Центрально Черноземных областей и прилегающих территорий: материалы конф. – Воронеж, 1972. – С. 15-16.
7. Ревин А.И. Методы реконструкций зон мелководий / В.И. Ревин, С.И. Шаев // Экологические и правовые аспекты эксплуатации водохранилищ: результаты первой междунар. науч.-практ. конф. (26-28 февр. 2003 г.) – Воронеж, 2003. – С. 119-123.
8. Шапов Г.И. Речные наносы / Г.И. Шапов. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 364 с.
9. Эдельштейн К.К. Водоохранилища России: экологические проблемы и пути их решения / К.К. Эдельштейн. – М.: Геос, 1998. – 277 с.
10. Mishon V.M. Reservoir Voronezhskoe / V.M. Mishon // Data Book of world lake environments. – Otsu-Kusatsu, 1993. – 12 p.

Mishon Vitaliy Mikhailovitch
Doctor of Geography, Professor of the chair of management of nature of the geography and geocology department of the Voronezh State University, Voronezh, tel. (4732)66-56-54, E-mail: root@geogr.vsu.ru, evm@yandex.ru