

К ВОПРОСУ О ЛИКВИДАЦИИ ВОДОХРАНИЛИЩ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ИХ ЛОЖА И БЕРЕГОВОЙ ПОЛОСЫ

Сообщение 3. Методические подходы к оценке водной эрозии донных отложений в ложе спущенных водохранилищ

© 2012 г. А.Н. Попов¹, В.И. Штыков²

¹ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования
и охраны водных ресурсов», г. Екатеринбург

²Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения,
Санкт-Петербург

Ключевые слова: пруд, водохранилище, ликвидация искусственных водоемов, донные отложения, эрозия, методы оценки.



А.Н. Попов



В.И. Штыков

Рассмотрены основные факторы, влияющие на интенсивность эрозии донных отложений и методические подходы к оценке ее интенсивности. Рекомендованы действия по ее снижению или ликвидации.

Значительная часть малых и средних водохранилищ России создавались для целей орошения и сельскохозяйственного водоснабжения. В целом, в настоящее время по предварительным оценкам до 50 % этих водных объектов по разным причинам утратили свое хозяйственное значение. Более того, старение водохранилищ, их заиление, неудовлетворительное состояние гидротехнических сооружений напорного фронта становится дополнительным фактором экологической опасности и причиной возникновения чрезвычайных ситуаций. Эта проблема усугубляется увеличением в последнее десятилетие напряженности гидрометеорологической обстановки, частоты возникновения гидрологических катастроф.

Водное хозяйство России № 6, 2012

Водное хозяйство России

В сложившейся к настоящему времени ситуации возникают обстоятельства, требующие ликвидации прудов, малых и (в исключительных случаях) средних водохранилищ. Такое мероприятие может быть целесообразным по следующим показаниям:

- 1) аварийное состояние гидросооружений напорного фронта;
- 2) бесхозность водоема, отсутствие собственника ГТС, потеря водохозяйственного значения;
- 3) длительный срок эксплуатации сооружений, заиление мертвого объема водохранилищ, интенсивное зарастание мелководий;
- 4) негативное влияние на водные ресурсы – неоправданно большие потери стока на испарение, цветение воды, вторичное загрязнение протекающих вод иловыми отложениями.

Из указанного перечня приоритетными являются утрата водохозяйственного значения, как правило, сопутствующая отсутствию собственника ГТС, и негативное влияние на водные ресурсы.

Процесс ликвидации прудов и водохранилищ требует научно обоснованных решений по организованному и контролируемому демонтажу гидротехнических сооружений, спуску водохранилищ, рекультивации их ложа и береговой полосы с возвращением аквальных ландшафтов в земельный оборот.

Негативными экологическими последствиями спуска водохранилищ могут являться:

- развитие водно-эрозионных процессов в ложе водохранилища;
- сползание верхнего разжиженного слоя отложений;
- активизация оползней коренных берегов речной долины;
- поступление большого количества взвешенных веществ в нижний бьеф;
- заиление нижележащих участков русла водотока;
- загрязнение воды в нижнем бьефе ингредиентами, содержащимися в поровых водах донных отложений;
- продолжительные сроки естественного самозарастания ложа водохранилища.

Нормальная или естественная эрозия природных ландшафтов подчиняется известным законам природы – геологическому и биологическому круговороту и, в конечном итоге, направлена на выравнивание поверхности суши. Темпы естественной эрозии весьма низки и не представляют угрозы для окружающей среды.

Эрозионные процессы в ложе спущенных водохранилищ усугубляются низкой устойчивостью отложений к размыву, характером рельефа речных долин, отсутствием растительности, обводненностью склонов. Ускоренная эрозия, возникающая в результате спуска водохранилищ и обнажения

донных отложений, приводит к нарушению баланса между аккумуляцией и выносом твердого материала. В отличие от ущерба, причиняемого эрозией почв на сельскохозяйственных угодьях, проявляющегося в сокращении мощности гумусового горизонта почвы, потере питательных веществ, ухудшении физических и биологических свойств почвы, недоборе сельскохозяйственной продукции, эрозия в ложе спущенных водохранилищ опасна, прежде всего, заилением нижележащих участков водотоков, загрязнением их взвешенными и биогенными веществами.

Анализ известных механизмов эрозии почв показывает, что смыв донных отложений будет происходить под влиянием удара дождевых капель и механического воздействия рассеянных струй и ручейков дождевой и снеговой воды, стекающей по склонам, и характеризуется следующими особенностями:

- размывающая и транспортирующая способности потока при увеличении удельного расхода воды возрастают;
 - переход потока из нерусловой формы в русловую резко снижает гидравлические потери напора, освободившаяся энергия затрачивается на размыв, в результате чего русловые эрозионные формы приобретают тенденцию к развитию;
 - размывающая и транспортирующая способности нерусловых потоков сильно возрастают во время интенсивных ливней, благодаря турбулентному действию капель; смыв происходит даже при уклонах, близких к нулевому, распространяясь на относительно горизонтальные поймы и надпойменные террасы;
 - в зависимости от гидравлического режима потока его эрозионная способность пропорциональна уклону (точнее синусу угла склона) в первой или второй степени;
 - шероховатость поверхности сильно замедляет скорость потока.
- Основной объем эрозии осуществляют потоки, имеющие своеобразные гидравлические свойства – очень низкое число Рейнольдса и высокое число Фруда.

Физико-химические особенности эрозии изучены плохо [1]. Известно, что на равнинах количество вещества, удаляемого водой в виде растворов и коллоидов, значительно превосходит количество твердого материала в форме взвешенных и влекомых наносов.

Эрозия донных отложений в ложе спускаемых водохранилищ будет определяться следующими факторами:

- уклон поверхности и длина склона;
- податливость самих донных отложений смыву;
- наличие и защитная роль остатков высшей водной растительности;
- интенсивность осадков;

– характер снегоотложения и последовательность схода снега на склонах.

Интенсивность выноса частиц определяется мутностью воды, сильно варьирующей в зависимости от конкретных условий. В.В. Звонков [2] установил три критические скорости течения воды, обуславливающие вынос и отложение мелкозема. Первая критическая скорость – начало движения частиц по дну потока; вторая – конец разбега частиц и начало их полета в потоке; третья – конец взвешенного состояния и начало ее тормозного пути на дне потока.

Согласно А.И. Желобову [3], наиболее опасный диаметр частиц грунта 0,015–0,033 см, ему соответствует наименьшая критическая скорость воды в потоке 0,18–0,22 м/с. При увеличении и уменьшении диаметра частиц наименьшая критическая скорость возрастает. Однако, как отмечает Н.И. Маккавеев [4], когда частицы поступают в турбулентный поток со стороны, то транспортируемое их количество тем больше, чем мельче их размеры. Введение крупного материала в поток может резко уменьшить его способность к эрозии, а добавление некоторого количества мелкого материала в поток стимулирует движение более крупных частиц, которые до этого поток не передвигал. Н.И. Маккавеев обращает также внимание на особенности эрозионной работы струй малой глубины на склонах и их недостаточную изученность. Эти склоновые потоки чаще всего ламинарные и высоко кинетические с бурным режимом течения. Их скорость не зависит от шероховатости поверхности, но в большей степени реагирует на изменение уклона, чем при турбулентном режиме.

Мутность воды при одной и той же крутизне склона может колебаться в широких пределах. Она зависит, с одной стороны, от живой силы потока $mv^2/2$, а с другой стороны – от податливости грунтов смыву, диапазон ее колебаний для почв составляет 0,5–40,0 г/л.

Значения интенсивности смыва почвы на склонах при ливнях и в период снеготаяния обобщены в работах [4–8]. При снеготаянии по мере обнажения почвы из-под снега почвенные комочки верхнего только что оттаявшего слоя легко распадаются на агрегаты, которые захватываются водой и уносятся. Известно [4–8], что при легкой податливости донных отложений смыву рассеянное прохождение вод при одном и том же объеме стока может обусловить больший смыв, чем концентрированное. На участках, защищенных остатками водной растительности, наоборот, при рассеянном стоке можно ожидать меньшего смыва, чем при концентрированном.

Анализ работы [9] по склоновой эрозии почв показывает, что при весеннем снеготаянии на первом этапе (до образования проталин) почвы защищены снегом, стекающая вода прозрачна, а смыв почвы практически отсутствует. Можно предположить, аналогичное развитие процесса и для

обнаженных донных отложений. На склонах без ложбин проталины обычно образуются, когда оставшийся запас воды в снеге при равномерном его отложении снижается приблизительно до 18–28 мм. В связи с этим важно учитывать перераспределение снега на склонах разной экспозиции и по элементам склонов.

По данным Новосильской станции [10] количество снега на склонах (снежность склонов) характеризуется в среднем следующими коэффициентами:

- ровная приводораздельная площадь (контроль) – 1,0;
- склоны восточной, юго-восточной и южной экспозиции – 0,5;
- склоны северо-восточной экспозиции – 1,0;
- склоны юго-западной экспозиции – 1,2;
- склоны северной и западной – 1,5;
- склоны северо-западной – 2,0.

На снегосдуваемых склонах мощность снежного покрова, как правило, уменьшается в направлении гидрографической сети, а на снегозаносимых – увеличивается. Следовательно, регулирование снегоотложения таким образом, чтобы на нижних выпуклых отрезках склонов было больше снега, чем на вышележащих, является важным приемом контролирования процессов эрозии.

В безморозный период возникновение водных потоков на склонах определяется осадками. Один из важнейших показателей развития эрозии на склонах – эрозионный потенциал осадков (ЭПО). Его абсолютная величина и географическое распределение во многом определяют интенсивность и распространение эрозии [1]. Для оценки ЭПО применяются в различном сочетании такие характеристики дождей, как слой осадков, интенсивность и энергия. Выполненные исследования показали, что произведение энергии дождя на его максимальную 30-минутную интенсивность тесно коррелирует со смывом. Значения ЭПО, вычисленные по 10-, 15- и 20-минутным интервалам, тесно коррелируют между собой [13].

В зонах с умеренным количеством осадков величина их ЭПО определяется не только слоем осадков, но и соотношением высокоинтенсивных ливней и обложных низкоинтенсивных дождей. Так, по меридиану Архангельска с севера на юг вплоть до Ростова-на-Дону количество осадков практически не изменяется, а величина ЭПО возрастает от 1,8 до 7–8 единиц, т. к. в Ростовской области значительная часть осадков выпадает в виде ливневых дождей. На широте Москвы до Красноярска, несмотря на уменьшение слоя осадков на 100–200 мм и более, ЭПО остается постоянным или даже несколько возрастает. Используя карту ЭПО, где вводится внутригодовое распределение ЭПО в виде нарастающей величины от месяца к месяцу в процентах от годового значения, и данные, представленные в работе [1], методом интерполяции можно рассчитать значение ЭПО на любую дату.

Способность почв противостоять смыву и размыву зависит от их физико-химических и водно-физических свойств и механического состава. Из физико-химических свойств важнейшими являются содержание гумуса и состав поглощающего комплекса. Органические вещества и тонкие коллоидные фракции почвы в присутствии катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} способствуют образованию водопрочных агрегатов, что обуславливает более рыхлое строение почвы, уменьшение ее объемного веса и увеличение водопрочности.

Механический состав почв в значительной степени определяет их податливость к эрозии: более тяжелые почвы лучше противостоят смыву, чем легкие. Наиболее податливы смыву при значительных уклонах и наличии стока песчаные почвы, при этом основная масса твердых продуктов перемещается по дну и в придонной зоне.

С учетом особенностей донных отложений водохранилищ можно предположить, что по уменьшению своей устойчивости к смыву они будут располагаться в следующем ряду: размытые глинистые и суглинистые почвы – размытые супесчаные почвы – песок – илистый песок – ил.

Комплекс свойств рельефа, способствующих возникновению стока, его концентрации и быстрому стеканию воды, по своей физической сути, определяет энергию потока. Роль рельефа при рассмотрении эрозии почв сельскохозяйственных земель нельзя рассматривать отдельно от других факторов и прежде всего обработки земель (вспашка, боронование, культивация), которая при прочих равных условиях увеличивает интенсивность эрозии на порядок [11].

Эрозионный потенциал рельефа (ЭПР) определяется прежде всего морфологией склонов – крутизной, длиной, формой, экспозицией, нано- и микро-рельефом поверхности.

Анализ данных по эрозии почв на склонах позволяет предположить, что большинство эмпирических зависимостей имеет следующую структуру [1, 7, 8]:

$$M = A I^n L^m x^{1,5}, \quad (1)$$

где M – расход смытого материала, кг/с;

I – уклон склона;

L – длина склона, м;

x – интенсивность осадков или водоотдачи из снега, мм/мин;

n – показатель степени влияния уклона склона, $n = 0,75-1,45$;

m – показатель степени влияния длины склона, $m = 1,4-1,5$;

A – коэффициент учитывающий другие факторы эрозии.

Анализ составляющих уравнения позволяет сделать заключение, что в условиях спущенных водохранилищ до формирования растительного пок-

рова наиболее эффективными противоэрозионными мероприятиями будут фрагментация склонов, перехват, отвод и отстой вод, поступающих с выше лежащей части склона.

При классификации видов водной эрозии обычно выделяют два основных вида – плоскостной смыв и линейный размыв. Для поверхностно-склоновой водной эрозии в ложе спущенных водохранилищ наиболее приемлемой представляется классификация Г.И. Швевса [12] (табл. 1).

Таблица 1. Классификация поверхностно-склоновой водной эрозии в ложе спущенных водохранилищ [12]

| <i>Вид</i> | <i>Подвид</i> | <i>Характерные черты процесса</i> | <i>Специфические условия, усугубляющие развитие эрозии</i> |
|--------------------------|-------------------------------------|--|---|
| 1. Эрозия разбрызгивания | – | Образуется при разбрызгивании капель, падающих на увлажненную поверхность почвы, имеющую наклон. В условиях негоризонтальной поверхности происходит преимущественное перемещение частиц в одном направлении | Отсутствие защитного действия растительности. Высокая увлажненность склона в период сработки грунтовых вод в бортах водохранилища |
| 2. Поверхностный смыв | 2.1. Поверхностный мелко-струйчатый | Происходит при образовании поверхностного стока в микроструях с глубиной, соизмеримой с крупностью перемещаемых частиц. Направление струй часто не совпадает с направлением максимального уклона (режим ламинарный или переходный) | Характер грунтов: ил, илистый песок, размытые почвы, песчаные отложения. Потеря размытыми почвами структуры |
| | 2.2. Ливневой поверхностный | Имеет место в тех же условиях, что и поверхностный мелко-струйчатый смыв, при наличии турбулентности, создаваемой падающими каплями | – |
| 3. Струйчатая эрозия | 3.1. Струйчатый размыв | Проявляется в ручьях поверхностного стока, направление которых преимущественно совпадает с направлением максимального уклона. Режим турбулентный, распределение скоростей по глубине не выражено | Рельеф речных долин – чередование склонов и террас. Малые значения r a z m y a y x скоростей |
| | 3.2. Ливневый струйчатый размыв | Образуется при тех же условиях, что и струйчатый размыв, при наличии дополнительной турбулентности, создаваемой ливневыми осадками, влияние которых убывает с ростом глубины потока | – |

Учитывая гидромеханическую сущность водно-эрозионного процесса, его математическую модель можно получить при помощи аналитического сопоставления лобовой и подъемной сил, с одной стороны, и силы сопротивления отрыву, с другой. Г.И. Швевсом [12] на основе аппроксимации теории речных наносов В.Н. Гончарова выведена следующая зависимость для поверхностного смыва почвы:

$$R = a_{\phi} dv \left(\frac{V - V_0}{V_0} \right)^3; \quad (2)$$

где R – расход наносов;

a_{ϕ} – коэффициент;

d – крупность наносов;

v – скорость потока;

V_0 – значение энергетического параметра, при котором начинается смыв;

$V = v + 0,01AM_i^{0,75}$, A – параметр, зависящий от покрытия почвы растительностью и M_i – мощность осадков.

Подробные методики определения составляющих уравнения (2) изложены в работах Г.И. Швевса [7, 8, 12].

Ввиду отсутствия экспериментальных данных для оценки размеров эрозии в ложе спущенных водохранилищ необходимо использовать расчетные зависимости. В настоящее время их известно более трех десятков [12]. С учетом целевой функции – оценки эрозии в ложе спущенных водохранилищ, логической обоснованности, четкого выделения гидрометеорологических, рельефных и грунтовых факторов, одной из наиболее обоснованных представляются зависимости Г.И. Швевса.

Величину ливневого смыва рассчитывают по формуле:

$$W_{\text{ЛО}} = 1,2 \cdot 10^{-4} j_R e^{-\lambda_P(0,85-100m)} \Phi(L, I) \sum K_{\text{ГМ}}; \quad (3)$$

где j_R – показатель относительной смываемости почвы;

λ_P – параметр функции влияния растительности на смыв почвы (изменяется от 1 для оголенной поверхности до 5 для целины и леса);

m – параметр формулы скорости, учитывающий шероховатость;

$\Phi(L, I)$ – рельефная функция;

$K_{\text{ГМ}}$ – гидрометеорологический фактор ливневого поверхностного смыва почвы.

Для весеннего периода величину модуля смыва определяют по формуле:

$$W_{\text{В}} = 10^{-5} j_P C_3 \lambda_{\text{РВ}} \rho_{\text{В}} \Phi_{\text{В}}(L, I) \eta \Delta X_{\text{В}}; \quad (4)$$

где j_P – частная характеристика относительной смываемости почв;

C_3 – коэффициент, характеризующий влияние экспозиции;

$\lambda_{рв}$ – параметр, учитывающий состояние подстилающей поверхности;

ρ_B – мутность стока;

$\Phi_B(L, I)$ – рельефная функция, отличающаяся от аналогичной в предыдущей формуле более низким показателем степени при уклоне;

η – средний коэффициент стока;

ΔX_B – среднегодовые запасы воды в снеге.

Достоинством уравнений (3) и (4) является возможность определения эрозионных потерь для любого отрезка времени с использованием стандартной гидрометеорологической информации. Подробные методики определения параметров этих уравнений и изложены в работах [7, 8].

Таким образом, обобщая все сказанное выше, можно сделать следующие выводы:

Высокая эрозионная опасность в ложе спущенных водохранилищ определяется характером рельефа речных долин, низкой устойчивостью донных отложений к смыву, полным отсутствием защитного действия растительности, обводненностью склонов речных долин при длительной сработке грунтовых вод.

При легкой податливости донных отложений смыву рассеянное прохождение вод при одном и том же объеме стока может обусловить больший смыв, чем концентрированное. На участках, защищенных остатками водной растительности, наоборот, при рассеянном стоке можно ожидать меньшего смыва, чем при концентрированном.

Уменьшать эрозию в весенний период можно путем регулирования снегоотложения таким образом, чтобы на нижних выпуклых отрезках склонов было больше снега, чем на вышележащих.

С учетом особенностей донных отложений водохранилищ можно предположить, что по уменьшению своей устойчивости к смыву они будут располагаться в следующем ряду: размытые глинистые и суглинистые почвы – размытые супесчаные почвы – песок – илистый песок – ил.

В условиях спущенных водохранилищ до формирования растительного покрова наиболее эффективными будут мероприятия по фрагментации склонов, перехвату, отводу и отстою вод, поступающих с вышележащей части склона.

Ввиду отсутствия экспериментальных данных, для оценки размеров эрозии в ложе спущенных водохранилищ целесообразно использовать расчетные зависимости, наилучшим образом соответствующие целевой функции, обладающие логической обоснованностью, четким выделением гидрометеорологических, рельефных и грунтовых факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Работа водных потоков / под ред. Р.С. Чалова. М. 1987. 194 с.
2. Звонков В.В. Водная и ветровая эрозия земли. М. 1962. 175 с.
3. Жолобов А.И. Экономическая эффективность удобрений на каштановых почвах // Химизация сельского хозяйства Волгоградской области. Волгоград. 1965. С. 19–24.
4. Маккавеев Н.И. О научных основах методики борьбы с эрозией // Эрозия почв и русловые процессы. М. 1970. Вып. 1. С. 52–60.
5. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М. 1955. 346 с.
6. Заславский М.Н. Эрозия почв. М.: Мысль, 1979. 245 с.
7. Долгилевич М.И., Швец Г.И., Зыков И.Г. Научные основы прогнозирования и система предупреждения эрозионных процессов. М.: Колос, 1992. 147 с.
8. Швец Г.И. Теоретические основы эрозиоведения. Киев; Одесса. 1981. 224 с.
9. Сурмач Г.П. Водная эрозия и борьба с ней. Л. 1976. С. 17–28.
10. Козменко А.С., Ивановский А.Д. Режим поверхностного стока в Центральной лесостепи // Гидротехника и мелиорация. 1953. № 1. С. 3–18.
11. Прыткова М.Я. Осадконакопление в малых водохранилищах. Л. 1981. 152 с.
12. Швец Г.И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка (на примере Украины и Молдавии). Л. 1974. 184 с.
13. Заславский М.Н. Карта эрозионного индекса дождевых осадков Европейской территории СССР и Кавказа // Эрозия почв и русловые процессы. М. 1981. Вып. 8. С. 17–29.

Сведения об авторах:

Попов Александр Николаевич, д. т. н., профессор, заведующий отделом, ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГУП РосНИИВХ), 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23; e-mail: pap1944@gambler.ru

Штыков Валерий Иванович, д. т. н., профессор, кафедра водоснабжения, водоотведения и гидравлики, Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9