

ГЕОМОРФОЛОГИЯ И НАРОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 627.4 : 551.311.21

Н. И. МАККАВЕЕВ

ВОЗДЕЙСТВИЕ КРУПНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО
СТРОИТЕЛЬСТВА НА ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В РЕЧНЫХ ДОЛИНАХ

Создание крупных долинных водохранилищ возбуждает ряд геоморфологических процессов, постепенно преобразующих облик речных долин. Поднятие базиса эрозии, вызванное постановкою плотины, является причиной регрессивной аккумуляции, распространяющейся по мере заиления водохранилища вверх по реке выше зоны подпора. В пределах самого водохранилища под воздействием волн, вдольбереговых течений, гравитационных процессов и сезонных колебаний уровня формируется своеобразный рельеф побережий. Ниже плотины развивается распространяющаяся вниз по реке глубинная эрозия и образуется терраса, относительная высота которой на главной реке убывает по мере удаления от плотины.

Со времени Ленинского плана ГОЭЛРО в нашей стране нарастающими темпами развивается крупное гидротехническое строительство, приведшее к созданию значительного числа водохранилищ. Только крупных водохранилищ, имеющих площадь зеркала более 100 км^2 , насчитывается сейчас около пятидесяти, причем некоторые из них, с площадью зеркала свыше 5000 км^2 , могут быть отнесены к категории внутренних морей (например, водохранилище Волжской ГЭС имени В. И. Ленина, площадь которого при нормальном подпорном уровне составляет 6500 км^2). В чашу некоторых водохранилищ вошли естественные озера, уровень которых был поднят путем подпора истока (так, поднят на 1 м уровень Байкала). Однако большинство водохранилищ дислоцируется в пределах речных долин; в настоящей статье рассматриваются только долинные водохранилища.

Водохранилища в долинах обычно отличаются от естественных озер как формой чаши, так и особенностями гидрологического режима. Для долинных водохранилищ характерно возрастание глубины в сторону плотины, значительная сезонная амплитуда изменений уровня и увеличение проточности во время многоводных половодий, когда производят усиленный сброс воды, чтобы предупредить переполнение водохранилища. Заполнение водохранилищ производится быстро — всего в течение нескольких лет, а иногда — одного года. Быстрота, с которой образуются искусственные водоемы, а также вышеуказанные режимные и морфологические особенности служат причинами того, что комплекс геоморфологических процессов, возбуждаемых возникновением водохранилищ, очень специфичен. В этом отношении водохранилища существенно отличаются от таких естественных образований, как проточные озера и устьевые эстуарии.

Появление водохранилищ резко нарушает естественно сложившийся ход процессов, формировавших рельеф речной долины. Возведение плотины повышает местный базис эрозии, вследствие чего влияние водохранилища на русловой режим реки выше плотины не ограничивается только зоной затопления и подпора, а постепенно распространяется все выше и выше по реке. В пределах самого водохранилища влияние кинетической энергии потока на русловые процессы убывает, но получает видную роль воздействие ветро-волновых процессов; развивается абразия берегов, которая способствует, в свою очередь, усилению гравитационных процессов на бортах долины. Русловой режим реки ниже плотины также существенно изменяется, чему виной трансформация стока воды и наносов водохранилищем. Здесь происходит постепенная перестройка продольного профиля главной реки и притоков, с образованием новой террасы. Изменения руслового режима могут, наконец, достигнуть дельты реки, отразиться на ее формировании и даже на динамике прилегающей части морского побережья. Таковы в общих чертах звенья «цепной реакции», вызываемой на значительном протяжении реки при помощи такого, узко локального, на первый взгляд, воздействия, как создание в долине напорного гидротехнического узла.

Прежде чем рассматривать более детально отдельные звенья цепи геоморфологических процессов, вызванных созданием водохранилища, надо сказать несколько слов о различии водохранилищ на равнинных и горных реках. Типичные равнинные водохранилища имеют максимальную глубину 20—30 м, при средней глубине 5—10 м и величине сезонной «сработки» уровней 3—7 м (Авакян, 1968). Напор на плотинах обычно не более 20—25 м. Для Русской равнины такой напор составляет около 0,1 полного падения большой реки. Долины равнинных рек обычно асимметричны. Для них типично образование со стороны отлогого борта широкой полосы своеобразных «маршей» — поверхностей террас, затопляемых при нормальном подпорном горизонте водохранилища, а при сработке уровней представляющих собою обширные территории, покрытые свежими песчаными или илистыми осадками. В зависимости от высоты уровня площади водохранилищ изменяются в 1,5—2,0 и более раз. Водохранилища обычно открыты ветрам (благодаря небольшой высоте берегов и значительной ширине долины) и поскольку берега образованы осадочными породами, поддающимися воздействию абразии, то последняя весьма энергично расширяет речную долину.

На больших горных реках в настоящее время строятся плотины, высота которых на порядок больше, чем на равнинных реках. Сезонная сработка уровней будет также очень велика, но при этом площадь зеркала водохранилищ будет изменяться незначительно. Благодаря узости долины, высоте берегов и большей устойчивости слагающих их пород, абразия не вызывает значительного расширения долин.

Геоморфологические процессы выше зоны подпора

На участке реки выше зоны максимального распространения подпора, вызванного плотиной, развивается регрессивная (наступающая против течения реки) аккумуляция. Начало ее приурочено к тому времени, когда в зоне выклинивания подпора оседет столько наносов, что в верхней части водохранилища сопротивление движению воды увеличивается. Гидравлический напор, необходимый для преодоления добавочных сопротивлений, получается за счет кинетической энергии потока на вышележащем участке реки, где по этой причине скорость течения заметно убывает (Маккавеев, Хмелева, 1961). Здесь начинается аккумуляция наносов, которая вызывает, в свою очередь, уменьшение скорости течения на соседнем участке выше по реке. Таким образом, по мере заиливания чаши водохранилища на все более значительном протяжении

отлагаются наносы выше по реке. Как показали эксперименты, объем отложений в зоне регрессивной аккумуляции лишь немного уступает объему отложений в самой чаше водохранилища.

Развитие регрессивной аккумуляции вызывает подъем отметок уровней воды в реке. На горных и полугорных реках, несущих много наносов, последствия регрессивной аккумуляции проявляются сравнительно быстро. С. Т. Алтунин (1960) наблюдал выше Фархадского водохранилища на Сырдарье «волну» изменения уровней, связанную с регрессивной аккумуляцией, распространявшуюся против течения со скоростью 0,6 км в год.

На больших водохранилищах равнинных рек пока еще не удалось проследить последствия регрессивной аккумуляции. Концентрация наносов в воде равнинных рек обычно на порядок меньше, чем в горных; соответственно менее интенсивно происходит и заиление водохранилищ. Только на р. Волге выше границы выклинивания подпора Куйбышевского водохранилища (ГЭС им. В. И. Ленина) заметна некоторая тенденция к повышению уровней воды. В данном случае интенсивному отложению наносов «помогала» р. Ока, выносившая начиная с сороковых годов увеличенный объем материала, так как в ее низовьях развивалась глубинная эрозия по причине снижения уровней половодья р. Волги.

Продольный профиль на участках, охваченных аккумуляцией, имеет меньший уклон, чем первоначальный. Тем не менее, по данным экспериментальных исследований С. Т. Алтунина и В. М. Шолохова, длина отрезка, в пределах которого прослеживается влияние регрессивной аккумуляции, при полном заилении водохранилища превосходит длину последнего. Это означает, что на равнинных реках аккумуляция может продвинуться на десятки или даже сотни километров от границы выклинивания подпора.

С аккумуляцией обычно связано образование островов, т. е. фуркация русла, суммарная ширина которого возрастает тем значительнее, чем интенсивнее аккумуляция. Для русловых процессов в зоне аккумуляции характерно периодическое блуждание главного течения реки между системами рукавов и попеременный подмыв берегов. В общем, регрессивная аккумуляция способствует развитию боковой эрозии.

Геоморфологические процессы в пределах водохранилища

В пределах чаши водохранилища кинетическая энергия потока, ранее бывшая главным активным фактором формирования рельефа русла, значительно убывает, но зато увеличивается энергия волнения, что приводит к заметному качественному изменению характера русловых процессов. Следуя предложенному С. Л. Вендровым (1959) разделению водохранилищ на три основных зоны — глубоководную, средних глубин и малых глубин — можно считать, что в общем влияние кинетической энергии потока убывает от мелководной к глубоководной зоне, и напротив, влияние энергии волнения в этом направлении возрастает.

В пределах водохранилища, по мере приближения к плотине, происходит не только уменьшение средней скорости течения, но нередко наблюдается распад скоростного поля потока. Направленное вниз по реке течение сохраняется только возле одного из берегов (или в пределах какой-нибудь борозды в ложе водохранилища). В пределах остальной акватории возникают серии водоворотных систем. Лишь во время очень высоких половодий, если при этом производится большой сброс воды в нижний бьеф, на большинстве створов водохранилища можно наблюдать единое направление струй потока. Во время штормов системы течений сильно усложняются, в связи с дрейфовыми, компенсационными, разрывными и циркуляционными перемещениями водных масс.

Обычно прослеживается тенденция к убыванию крупности наносов и мощности слоя осевшего материала в направлении от мелководной к глубоководной зоне. Вместе с тем, вследствие сложности и изменчивости скоростного поля, наблюдается значительная местная изменчивость характеристик аккумулятивной толщи. Как правило, отчетливо выражена сезонная слоистость осадков, причем толщина прослоев колеблется от нескольких сантиметров до долей миллиметра, в общем убывая от мелководной к глубоководной зоне. В пределах последней местами формируются типичные ленточные глины. Очень своеобразную фацию осадков представляют отложения мутьевых потоков (Леви, 1958), которые в отдельных случаях переносят в придонных слоях водохранилища на всем протяжении, вплоть до плотины, значительные объемы мелкого песка и ила (Маккавеев, Карасева, 1969).

Абразионная деятельность волн очень наглядно и в большом масштабе проявляется немедленно по заполнении водохранилища. Волновой переработке берегов водохранилищ посвящено большое число исследований (Вендров, 1966; Золотарев, 1956; Качугин, 1959; Розовский, 1962; Широков, 1968 и др.), благодаря чему качественная сторона этого процесса относительно хорошо выяснена.

При сильных ветрах волны на водохранилищах могут достигать значительной высоты. Например, на Куйбышевском водохранилище при скорости северо-западного ветра 18—20 м/сек в районе Хрящевки высота волн составляет 3,0 м; на Рыбинском водохранилище при скорости северного ветра 20 м/сек высота волны у Леонтьевского достигает 2,7 м (Зарбаилов, 1963). При высоких залесенных берегах, узкой и извилистой акватории даже сильные ветры не возбуждают большой волны в водохранилище. Зато в открытой безлесной долине создается полная возможность взаимодействия воздушных и водных масс. В значительной мере по этой причине, на Цимлянском и Каховском водохранилищах берега имеют преимущественно абразионный характер. Длина абразионных берегов составляет на Цимлянском водохранилище 65%, а на Каховском 85% от общей длины береговой линии (Бахтияров и др., 1969). Кроме того, на общую интенсивность абразионных процессов оказывают влияние литология и строение берегов, размеры водохранилища, интенсивность ветров, длительность периода открытой воды, амплитуда сезонных изменений уровня и др. Отдельные участки берега абрадируются выборочно: в первую очередь абразия затрагивает расположенные на ветре берега мысов, особенно если глубины подходят близко к берегу. Очень легкой добычей абразии обычно оказываются свежие делювиальные и осыпные шлейфы, а также (вне зависимости от возраста) песчаные и лёссовые породы. Низкие берега, сложенные такими породами, нередко отступают со скоростью, измеряемой десятками метров в год (при увеличении высоты берега скорость отступления уменьшается).

Подтачивание абразией оснований береговых склонов способствует гравитационным деформациям последних. В зависимости от характера пород, слагающих берег, развиваются деформации обвального, осыпного и оползневого типов. Активизации оползней способствует не только разрушение их упорных призм абразией, но и поднятие уровня грунтовых вод, которое обычно прослеживается в прибрежной полосе шириной от нескольких сотен метров до нескольких десятков километров (Печеркин, 1969).

Энергичная переработка аллювия террас, пролювиально-делювиальных накоплений, лёссовых покровных пород и других рыхлых отложений, выполняющих долину, приводит к быстрому образованию (в течение нескольких лет) полосы мелководья вдоль берегов. Частично это полоса составлена бенчем, частично разровненными прибоем деляпситами или обвально-осыпными толщами, частично же сложена продуктами

абразии и принесенными вдольбереговыми течениями наносами. Наличие отмели ослабляет воздействие прибоя на берег, и отступление последнего замедляется. Уменьшение скорости смещения берегов обнаруживается уже через несколько лет после заполнения водохранилища (Финаров, 1969). Однако некоторое влияние на ослабление темпов отступления оказывают также увеличение высоты берегов по мере подрезания наклонного борта долины и то, что абразии, после удаления чехла делювия и выветрелой толщи, приходится воздействовать на более прочные грунты.

Вдольбереговые потоки наносов, питаемые продуктами абразии и выносами из притоков, очень быстро формируют аккумулятивные формы рельефа прибрежной зоны — бары, стрелки, косы, пересыпи. В первые годы существования водохранилища вдольбереговые потоки наносов переносят материал на небольшие расстояния. При затоплении долины образуется много глубоких и узких бухт на месте балок и других понижений рельефа. Каждая из таких бухт представляет собою ловушку для вдольберегового потока наносов, оставляющего в ней значительную часть переносимого материала (Маккавеев и др., 1968). Поэтому пересыпи, отчленяющие от акватории водохранилища серии лагун, являются первой, наиболее заметной аккумулятивной формой, появляющейся на побережье. Когда заканчивается отчленение большинства бухт, образуются вдольбереговые потоки наносов значительного протяжения. Деятельность вдольбереговых потоков, определяющих условия баланса наносов на отдельных участках побережья, оказывает большое влияние на развитие рельефа берегов, но систематическое исследование этих потоков в водохранилищах еще только начинается. Преимущественная абразия мысов и заполнение наносами заливов приводит к некоторому сокращению длины береговой линии и сглаживанию ее очертаний.

Геоморфологические процессы ниже водохранилища

Трансформация режима реки, вызванная водохранилищем, существенно сказывается на русловых процессах нижележащего участка реки. Если водохранилище достаточно емкое, то в его пределах остается большая часть твердого стока реки. Выходящий из водохранилища поток снова постепенно насыщается наносами за счет размыва ложа реки и твердого стока притоков. Характерно, что глубинная эрозия преобладает над боковой; размыв берегов обычно становится менее интенсивным, чем при естественном режиме. Форма сечения русла заметно изменяется; ложе речного потока расширяется в придонных слоях, так что средняя глубина русла увеличивается (Серебряков, 1960).

Глубинная эрозия вначале появляется на приплотинном участке реки и затем распространяется вниз по течению (трансгрессивно). Скорость продвижения «переднего фронта» трансгрессивной эрозии составляет на больших равнинных реках несколько километров, а на горных — несколько десятков километров в год (Федоров, 1969). В зоне, охваченной эрозией, происходит не только углубление ложа реки, но и указанная выше трансформация живого сечения. Уменьшение отметок дна и трансформация поперечного сечения русла вызывают снижение уровней реки, особенно заметное при малых расходах воды. Скорость снижения уровня зависит от уклона и расхода воды, а также от характера донных отложений и на различных гидроузлах составляет от 1—2 см до нескольких десятков сантиметров в год. Если русло подстилают рыхлые отложения (древние аллювиальные, озерные и т. п.), то, по-видимому, в конечном счете должна произойти значительная трансформация продольного профиля реки. Относительная высота образующейся террасы наибольшей величины достигает на приплотинном участке реки и вниз

по течению убывает. Плавность продольного профиля при врезании сильно нарушается; на участках, где глубинная эрозия несколько задерживается, образуются местные увеличения уклонов с убыстрением течения. Большинство рукавов по мере врезания начинает отмирать, и поток постепенно собирается в одно русло. Этот процесс отчетливо прослеживается в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС (Маккавеев и др. 1969).

Снижение уровня половодья, вызванное регулирующим влиянием водохранилища, сказывается на режиме притоков, впадающих ниже плотины, как понижение базиса эрозии. В низовьях притоков развивается интенсивная глубинная эрозия, иногда принимающая катастрофический характер. Так, С. Донец в первые годы после введения в эксплуатацию Цимлянского гидроузла, буквально перекрывал своими выносами русло нижнего Дона, а глубина плесов в низовьях С. Донца увеличилась в 2—3 раза.

Когда продольный профиль главной реки и притоков ниже водохранилища примет форму, соответствующую новым условиям гидрологического режима, то поступление наносов в устьевую область реки сильно сокращается. Нарушение баланса наносов, несомненно, должно сказаться на динамике морских побережий. Прекращение поступления наносов в дельту р. Риони, вызванное перемещением русла реки к северу, явилось причиной быстрого отступания береговой линии. Несмотря на отдаленное взморье, берег отступал со скоростью около 30 м в год, и темпы абразии удалось снизить только ценою значительных затрат. Вопрос о судьбе речных дельт в кавказской части Черноморского побережья особенно остро встает в связи с проектами создания крупных водохранилищ на реках Кодори и Бзыби, а также постройкою плотины на Ингури. Узость шельфа и большая глубина моря возле берегов создают неблагоприятную обстановку для сохранности дельт этих рек в случае сокращения поступления твердого материала.

ЛИТЕРАТУРА

- Авакян А. Б., Шарипов В. А. Водохранилища гидроэлектростанций СССР. М., «Энергия», 1968.
- Алтуни С. Т. Заиление водохранилищ и размывы русла в нижнем бьефе.— Тр. III Всесоюзного гидрологического съезда, т. V, 1960.
- Бахтияров В. А., Колбутов А. Д., Финаров Д. П., Широков В. М. Анализ влияния эксплуатационного режима водохранилищ различного типа на устойчивость берегов.— Тр. координационных совещаний по гидротехнике. Л., «Энергия», вып. 53. 1969.
- Вендров С. Л. Проблемы формирования рельефа чаши (берегов и дна) больших водохранилищ.— Материалы II геоморфологического совещания, М., 1959.
- Вендров С. Л. Динамика берегов крупных водоемов в связи с использованием водных ресурсов.— Изв. АН СССР, сер. геогр. 1966, № 2.
- Зарбаилов А. Ю. Ветроволновой режим Куйбышевского, Камского и Рыбинского водохранилищ. М., Изд-во ЦНИИЭВГА, 1963.
- Золотарев Г. С. Инженерно-геологическое изучение береговых склонов водохранилищ и оценка их переработки.— Тр. Лабор. гидрогеол. проблем АН СССР, т. XII 1956.
- Качугин Е. Г. Инженерно-геологические исследования и прогнозы переработки берегов водохранилищ. В сб.: Рекомендации по изучению переработки берегов водохранилищ, Госгеолтехиздат, 1959.
- Леви И. И. Закономерности движения потоков большой мутности в водохранилищах.— Научн. докл. высшей школы. М., 1958, № 1.
- Маккавеев Н. И., Хмелева Н. В. и др. Экспериментальная геоморфология. М., Изд-во МГУ, 1961.
- Маккавеев Н. И., Карасева Г. А., Митякова М. Н. Заносимость портов-убежищ в водохранилищах.— Речной транспорт, 1969, № 7.
- Маккавеев Н. И., Беркович К. М., Чалов Р. С., Лодина Р. В., Богомолов А. М., Хижов Б. М., Шутов А. М. Руслевой режим Средней Оби.— Депонентное изд. ВИНТИ, 1969.
- Печеркин И. А. Геодинамика побережий пермских водохранилищ. ч. II, Изд-во Пермского гос. ун-та, 1969.

- Розовский Л. Б. Итоги исследований переработки берегов днепровских водохранилищ. Киев, Изд-во АН УССР, 1962.
- Серебряков А. В. Гидрологические особенности Нижнего Дона после зарегулирования его стока Цимлянским водохранилищем.— Тр. III Всесоюз. гидрол. съезда, т. V, Гидрометеиздат, Л., 1960.
- Федоров Б. Г. Эрозия в нижнем бьефе ГЭС.— Тр. ЦНИИЭВта, вып. 68, М., 1969.
- Финаров Д. П. Особенности стадийного развития берегов крупных водохранилищ.— Тр. координационных сов. по гидротехнике, вып. 53, Л., «Энергия», 1969.
- Широков В. М. Некоторые особенности развития береговой зоны крупных водохранилищ.— Сб. Региональные исследования водных ресурсов бассейна р. Оби. Новосибирск, 1968.

Географический факультет Московского
государственного университета им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию
20.I.1970

THE INFLUENCE OF LARGE HYDROTECHNICAL CONSTRUCTIONS ON GEOMORPHOLOGICAL PROCESSES IN VALLEYS

N. I. MAKKA VEEV

Summary

The numerous large storage reservoirs essentially change the landscape of many river valleys. The rising of the erosion basis, caused by the construction of a dam, as well as the transformation of a hydrologic regime of a river under the influence of the storage reservoir, are the reasons for a sequence of interrelated geomorphological processes. From the edge of the affluent, caused by the dam, further up the river there gradually spreads a regressive accumulation, due to which simultaneously with the rising of the valley floor, the levels of water in the river also rise. Within the storage reservoir itself, under the influence of waves, lengthwise currents, seasonal changes of the water-level, and gravitational processes on the slopes, there forms a peculiar relief of the coast, characterized by large areas of recurrent inundation, an abundance of lagoons—detached bays, and high cliffs of retreating banks in the abrasion areas. Downstream below the dam there develops deep erosion. A terrace forms rapidly here, the relative height of which on the main river diminishes towards the mouth, while on the tributaries, on the contrary, it increases towards their estuaries.
