ПНИИИС Госстроя СССР

Рекомендации

по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилищ для строительства



Москва 1987

gost.e-ecolog.ru

Производственный и научно-исследовательский институт
по инженерным изысканиям в строительстве

(ПНИИИС) Госстроя СССР

Рекомендации

по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилищ для строительства

Москва Стройиздат 1987

УДК 627.521.1" 313

Рекомендовано к изданию решением секции Научно-технического совета ПНИИИС Госстроя СССР.

Рекомендации по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилищ для строительства / / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1987. – 72 с.

Предназначены для оценки и прогноза размыва берегов крупных равнинных рек и водохранилищ под действием ветровых волн и стоковых течений. Рекомендации по расчету боковой эрозии применимы при сложении берега аллювиальными породами и расположении его в непосредственной близости к основному руслу меандрирующей реки с естественным режимом. Допускается также применение этих рекомендаций при нахождении меандрирующей реки в пределах свободного нижнего бьефа и верхнего района подпертого нижнего бьефа гидроузла. Рекомендации по прогнозу ветроволнового размыва берегов следует применять на проектируемых и существующих водохранилищах при сложении берега несвязными и связными породами. Освещаются также состав и особенности изысканий для получения исходных данных, необходимых при оценке и прогнозе размыва берегов.

Для инженерно-технических работников проектно-изыскательских организаций.

Табл. 15, ил. 9, прил. 2.

Р $\frac{3202000000 - 297}{047\,(01) - 87}$ Инструкт.-нормат., 1 вып. –98–86

©Стройиздат, 1987

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие Рекомендации составлены на основе многолетних исследований Дзержинской карстовой лаборатории и Сибирского филиала ПНИИИС. Они базируются на результатах теоретических разработок и на материалах наблюдений в условиях рек Средней Оби и Иртыша, а также водохранилищ и свободных нижних бьефов гидроузлов на Каме и Верхней Волге.

Рекомендации могут быть использованы для оценки и прогноза ветроволнового размыва берегов (ВВРБ) и боковой эрозии на крупных равнинных реках, находящихся в естественном или зарегулировочном состоянии.

Оценка и прогноз боковой эрозии (величины отступания ровки берега) строятся на использовании морфологических признаков поперечного профиля основного русла и показателей уровенного режима реки в половодье.

Предлагаемый метод расчета боковых деформаций, вызываемых преимущественно воздействием стокового течения, применим на меандрирующих реках, имеющих половодье, при условии сложения берега аллювиальными породами и расположении его в непосредственной близости к основному меженному руслу реки, а также в аналогичных условиях, но при нахождении реки в пределах свободного нижнего бьефа и верхнего района подпертого нижнего бьефа гидроузла.

По сравнению с существующими методами рекомендуемый метод дает возможность оценить размыв берега не только на длительный, но и на короткий срок, не имея данных об изменении берега за предшествующий период. Этот метод отличается простотой и не требует выполнения большого объема изысканий. Однако это не исключает возможность применения для прогноза на длительный срок, например, метода, опубликованного в Рекомендациях по размещению и проектированию рассеивающих выпусков сточных вод (М.: Стройиздат, 1981. – 224 с.).

Метод, предлагаемый для прогноза ветроволнового размыва берегов водохранилищ, представляет собой систему расчетных и графических операций, выполнение которых позволяет определить величину отступания бровки берега, объемы размытой породы, наносов, откладываемых на свале прибрежной отмели, любой заданной обеспеченности, а также построить соответствующий им прогнозный профиль берега и прибрежной отмели на заданный срок. Этот срок может отсчитываться от начала заполнения или от любого другого момента эксплуатации водохранилища.

Данный метод можно применять на проектируемых и существующих водохранилищах с различным уровенным режимом при разнообразной конфигурации береговой линии, на берегах любой высоты и формы, сложенных несвязными и связными породами.

Рекомендуемый метод прогноза размыва берегов, в отличие от предложенных ранее методов, наиболее полно учитывает условия размыва берегов ветровыми волнами и позволяет получить более обоснованные результаты с любой заданной их обеспеченностью.

Расчет размеров волн производится в соответствии с требованиями СНиП 2.06.04–82 "Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)" и прил. 1 "Руководства по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения" (Л.: ВНИИГ, 1977. – 316 с.), а при расчетах суммарных волноэнергетических характеристик учитывается энергия всех волн в системе, а также конфигурация береговой линии и ее изменения во времени, колебания уровня воды. Кроме того, предложен учет изменчивости средних многолетних волноэнергетических характеристик во времени. Более обоснован расчет коэффициента аккумуляции материала на свале прибрежной отмели, зависящий от волноэнергетических характеристик, стадии развития берега, баланса наносов, гранулометрического состава пород, различия в плотности пород и наносов в сухом состоянии, степени влияния стокового течения. Влияние на интенсивность размыва формы и высоты берега учитывается само собой при построении прогнозного профиля и благодаря учету в расчетах ширины отмели. Затухание размыва берега поставлено в зависимость от роста всей ширины отмели.

Рекомендации могут быть использованы для принятия решений о хозяйственном использовании береговой зоны рек и водохранилищ, в частности для определения безопасных сроков эксплуатации и местоположения различных сооружений в береговой зоне, при обосновании целесообразности и сроков выполнения берегозащитных и водоохранных мероприятий, их вида и объема (размеров).

Рекомендации разработаны Дзержинской карстовой лабораторией ПНИИИС (канд. географ. наук Л.Б. Иконников – введение, пп. 1.1–1.3, 1.10 – 1.17, разд. 2, 4, 5, инж. В.П. Пичугина – п. 5.11) и Сибирским филиалом ПНИИИС – инж. И.Ш. Ибрагимов пп. 1.4 – 1.9, разд. 3). Научное редактирование Рекомендаций выполнено Л.Б. Иконниковым.

1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИНАМИКИ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ

Общие понятия

1.1. Под *берегом* следует понимать территорию, расположенную выше среднего меженного уровня воды в реке или выше нормального подпорного уровня воды в водохранилище, рельеф которой создан преимущественно (или подвергается коренному преобразованию) под влиянием водотока или водоема. Берега развиваются в неразрывной связи с их продолжением – *подводным береговым склоном*, представляющим собой прибрежную мелководную часть дна, где размещаются такие характерные формы рельефа, как бечевник или прибрежная отмель, береговые аккумулятивные формы. Берег и подводный береговой склон вместе образуют *береговую зону*.

1.2. К *береговым процессам* следует относить процессы, которые так или иначе участвуют в формировании берегов, представляют собой различные виды взаимодействия литосферы с гидросферой и атмосферой и характеризуются многообразием и взаимосвязанностью развития. К береговым процессам относятся. размыв берегов под действием ветровых и судовых волн, русловая и ветровая эрозии, процессы движения пород на склонах под влиянием гравитации, криогенные процессы, различные по генезису аккумулятивные процессы и др.

1.3. Несмотря на разнообразие береговых процессов облик конкретного берега и характер его изменения определяются обычно активным действием одного-двух из них, которые в данном случае выступают в роли ведущих, контролируя деятельность других процессов. На различных стадиях и фазах формирования берега ведущими могут быть разные процессы.

1.4. Формирование берегов определяется в первую очередь действием тех процессов, которые непосредственно связаны с рекой или водохранилищем. Они активизируют и поддерживают развитие других процессов, происходящих в толще пород, слагающих берег, и на земной поверхности. Последние со своей стороны влияют на активность ведущих процессов.

Влияние реки или водохранилища на береговую зону проявляется в форме механического воздействия ветрового волнения, стокового течения, льда, теплового и химического (растворяющего) воздействия на породы, изменения их обводненности и движения заключенных в них подземных вод. В настоящих Рекомендациях рассматриваются главным образом первые два из перечисленных видов воздействий. Они имеют наибольшее распространение и представляют наибольшую опасность для берегов равнинных рек и водохранилищ СССР, расположенных вне криолитозоны.

Особенности динамики береговой зоны р. К

1.5. Ведущим берегоформирующим процессом является русловой процесс, совершаемый под действием текущей воды. Внешним его проявлением служит размыв пород, слагающих берега, на одних участках и отложение твердого материала – на других.

1.6. Водный поток при своем движении совершает береговые переформирования, характер и интенсивность которых при прочих равных условиях зависят от высоты берегов. Низкие пойменные берега находятся под преобладающим влиянием руслового процесса.

1.7. Процессы русловой эрозии и аккумуляции наиболее интенсивны во время половодий. В период подъема уровня речные воды, разливаясь по пойме, подходят к подножью склонов надпойменных террас или водораздельному склону долины. Увеличение акватории реки в этот период способствует образованию ветровых волн, оказывающих разрушительное действие на берега. Размыв берегов сопровождается гравитационными движениями пород и склоновой эрозией, что в свою очередь способствует дальнейшему размыву берега рекой. На спаде половодья, когда речные воды локализуются в русле, разрушение надпойменных террас речными водами ослабевает, а пойменных берегов усиливается.

Аккумулирующая деятельность речных вод выражается в наращивании пойм в высоту, в образовании отмелей, побочней, осередков и кос.

1.8. Берега большинства равнинных рек сложены на значительном протяжении аллювиальными отложениями, представленными в основном песчаным и глинистым материалом.

1.9. Важнейшими физико-механическими свойствами аллювиальных пород, от которых прежде всего зависит сопротивляемость пород размыву речным потоком, являются плотность, пористость и влажность. Влажность наиболее изменчива во времени и определяется продолжительностью увлажнения пород в массиве. После длительного пребывания во время половодья в непосредственном контакте с водным потоком породы на склонах наиболее легко подвергаются разрушению.

1.10. Динамика берегов равнинных рек подчиняется закономерностям плановых деформаций русла. Согласно Рекомендациям по размещению и проектированию рассеивающих выпусков сточных вод (М.: Стройиздат, 1981. – 224 с.), реки по характеру деформаций подразделяются на следующие типы: ленточно-грядовый, побочневый, меандрирование (ограниченное, свободное и незавершенное), многорукавность (пойменная и русловая).

1.11. Среди перечисленных типов руслового процесса лишь *ленточно-грядовый* и *побочневый* характеризуются слабыми плановыми деформациями, относительной устойчивостью берегов русла.

1.12. На реках, где русловой процесс развивается по типу *свободного меандрирования,* на вогнутых берегах излучин происходит закономерное чередование эрозионных и аккумулятивных процессов. В верховой части преобладает аккумуляция, в пределах середины излучины – боковая эрозия. На низовой части излучины наблюдается преимущественно глубинная эрозия и, как следствие этого, обрушение берега.

1.13. При *незавершенном меандрировании* интенсивность береговых деформаций, а также распространение вдоль вогнутых частей основного русла зон эрозии и аккумуляции связаны главным образом с развитием спрямляющей протоки. На излучинах основного русла наблюдается такая же последовательность в изменении характера деформаций, что и при свободном меандрировании. Вместе с тем отмечается тенденция увеличения зоны аккумуляции за счет зон боковой и глубинной эрозии при одновременной активизации руслового процесса в пределах спрямляющей протоки, где берега вследствие этого все чаще подвергаются размыву.

1.14. На участках, где в русле имеются относительно узкие и вытянутые вдоль реки острова и осередки (*русловая многорукавность*), интенсивность и направленность береговых деформаций связаны в большей степени с характером передвижения этих аккумулятивных форм. Приближаясь к одному из берегов русла, острова и осередки вызывают стеснение протоки и тем самым способствуют энергичному берегообрушению. Этот процесс обычно прекращается после присоединения указанных форм к берегу.

1.15. В условиях развития руслового процесса по типу *ограниченного меандрирования* деформации берегов связаны главным образом с перемещением вдоль русла перекошенных в плане гряд и побочней. Наблюдается активный обмен наносами между поймой и руслом. Вследствие этого пойменные берега подвержены постоянным переформированиям, в то время как более высокие берега, относящиеся к надпойменным террасам, характеризуются относительной стабильностью.

1.16. При *пойменной многорукавности* в отдельно взятых рукавах развитие руслового процесса подчиняется выше рассмотренным закономерностям. Эрозионно-аккумулятивные процессы по своей интенсивности и направленности характеризуются большим разнообразием, что связано с энергичной разработкой одних рукавов и одновременным обмелением других.

Особенности динамики береговой зоны водохранилищ

1.17. С момента создания на реке водохранилища начинается преобразование форм рельефа, в пределах которых размещается или с которыми контактирует водохранилище, так как эти формы не соответствуют новым гидрологическим и гидрогеологическим условиям. Наиболее интенсивные изменения рельефа происходят вблизи береговой черты водохранилища, затрагивая как побережье, так и прибрежную акваторию.

1.18. *Размыв берегов волнами* является, как правило, ведущим береговым процессом. При благоприятных условиях этот процесс может происходить в любых частях водохранилища. Он осуществляется преимущественно ветровыми волнами, а также сопутствующими или связанными с ними течениями. К важнейшим условиям, влияющим на характер и интенсивность волнового размыва, относятся: форма и размеры берегового склона, конфигурация береговой линии и положение ее по отношению к волнообразующим направлениям, геолого-литологическое

строение берегового склона, сопротивляемость размыву (размываемость) слагающих его пород и способность материала этих пород к накоплению в прибрежной зоне водоема и к участию во вдольбереговом потоке наносов, уровенный режим водохранилища. Граничными условиями для размыва берегов под действием ветровых волн являются сопротивляемость пород, превышающая размывающую способность волн, и неблагоприятные условия для ветрового волнения – слабая ветровая активность, малые размеры (ширина и глубина) акватории, малый угол (менее $3–5^{\circ}$) берегового склона, ледообразование на водоеме и зарастание водоема.

1.19. По вертикали зона непосредственного воздействия волнения на береговые склоны определяется размахом колебания уровня воды в безледное время и наибольшими размерами волн при крайних положениях уровня воды.

1.20. В формировании береговой зоны участвуют ветровые волны всех размеров. В начальный момент после заполнения водохранилища на размыв берегов и переотложение размытого материала пород затрачивается максимальная доля энергии ветровых волн, подходящих к берегу. Основную работу при этом выполняют чаще всего не самые высокие волны, продолжительность действия которых невелика, а волны меньших размеров, но более часто повторяющиеся. При скорости ветра менее 3 м/с волны очень малы и их воздействие на берег ничтожно.

1.21. Ветроволновой размыв берегов (ВВРБ) приводит к необратимым (однонаправленным) изменениям некоторых условий: геолого-литологического строения, формы и размеров берегов; состава грунтов на дне и глубин водоема, а также плановых очертаний береговой линии, что в свою очередь вызывает существенную перестройку самого процесса дальнейшего размыва берега и при определенных условиях практически полное его затухание.

1.22. Вызывая отступание берега и накопление возле него части размытого материала, процесс ВВРБ обусловливает появление прибрежной отмели и продольного потока двигающихся по ней наносов. Общее выравнивание берега в плане за счет срезания мысов и отчленения заливов пересыпями способствует формированию единого продольного потока наносов, обеспечивающего взаимосвязанное развитие берега на значительном его протяжении.

Участок берега в плане в пределах действия единого потока наносов можно рассматривать как динамическую систему, имеющую относительно самостоятельное развитие. В этой системе различаются зоны дефицита, транзита и зона преобладающего отложения наносов, где размыв берега в отдельных случаях происходит в начале эксплуатации водохранилища, а затем берег начинает развиваться по аккумулятивному пути. Обмен наносами между зонами осуществляется за счет миграции наносов, т.е. местных и кратковременных подвижек наносов вдоль берега в том или ином направлении.

1.23. Образование прибрежной отмели и продольного потока наносов способствует уменьшению доли суммарной энергии ветровых волн, идущей непосредственно на размыв берега. Чем шире и положе отмель, тем

больше доля энергии волн, расходуемая на преодоление трения, тем слабее в общем обратный компенсационный отток воды во время волнения, транспортирующий размытый материал от берега, тем сильнее рефракция волн, способствующая уменьшению продольной составляющей энергии ветровых волн, а следовательно, и продольного потока наносов.

В условиях достаточно широкой прибрежной отмели размыв берегов происходит лишь при стоянии уровня выше наиболее часто повторяющихся его положений, когда берегозащитный эффект прибрежной отмели ослабевает. Общая тенденция к ослаблению размыва берегов волнами по мере роста прибрежной отмели особенно четко прослеживается на водохранилищах с назначительными колебаниями уровня воды в безледное время. Вполне возможно, что на более поздних стадиях развития берегов существующих водохранилищ будет прослеживаться чередование периодов ослабления (или даже полного прекращения) и активизации ВВРБ. Это может быть связано с чередованием периодов построения и разрушения прибрежных отмелей вследствие изменчивости ветроволновых процессов в условиях неустойчивого уровня воды в водоеме, необратимого выноса различными течениями твердого материала из прибрежной зоны в открытую часть водоема или перераспределения его вдоль берега, размыва прибрежной отмели талыми водами в период предполоводной сработки водохранилища.

При длительной эксплуатации водохранилища возможно изменение по тем или иным причинам вида регулирования, а иногда и общей величины стока воды через гидроузел. Это отражается на уровенном режиме водоема, что может в случае общего повышения уровня воды вызвать на некоторый период оживление ВВРБ.

1.24. *Воздействие на берега судовых волн* обычно несущественно, но иногда представляет опасность при нахождении фарватера вблизи берега на недавно заполненных водохранилищах с интенсивным судоходством.

1.25. В верховьях водохранилищ в размыве берегов наряду с волнением принимает участие стоковое течение. Особенно активный *размыв берегов стоковым течением* возможен на вогнутых в плане участках. Интенсивность боковой эрозии русла зависит прежде всего от сопротивляемости пород размыву, скорости и направления течения вблизи берега. При расположении водохранилища в каскаде наибольшая активность стокового течения отмечается в зоне влияния суточного регулирования стока верхним гидроузлом. Вниз по длине любого водохранилища наблюдается закономерное ослабление стокового течения, а следовательно, уменьшается в целом и боковая эрозия. Боковая эрозия развивается главным образом в периоды прохождения половодья, паводков или значительных попусков воды из вышележащего водохранилища. Общая направленность в изменении темпов боковой эрозии определяется характером руслового процесса, стадией его развития, а также тем, в пределах какого элемента русла в плане находится рассматриваемый участок берега.

Стоковые течения усиливают размыв берегов под действием ветровых волн, так как ограничивают рост прибрежной отмели и увеличивают ее крутизну. Кроме того, они способствуют перемещению прибрежных наносов вниз по длине водоема.

1.26. Размыв берегов под действием ветроволновых процессов и стоковых течений сопровождается оживлением целого ряда береговых процессов, выделяемых в особую группу *склоновых процессов*. Склоновые процессы происходят под влиянием гравитации и вызывают смещение пород на размываемых берегах в форме осыпи, обвала, оползня, овражной эрозии, солифлюкции, плывуна. Преобладание того или иного из склоновых процессов определяет общий характер рельефа берегов.

1.27. Общие черты и особенности динамики берегов, развития отдельных береговых процессов в значительной мере определяются общей физико-географической обстановкой территории расположения водоема, формой ложа и размерами водохранилища, уровенным режимом, зависящим в основном от характера регулирования речного стока, а также возрастом водохранилища. В данной работе рекомендации разработаны применительно к условиям крупных (с площадью водной поверхности более 100 $км^2$) водохранилищ, располагающихся на равнинных реках СССР, осуществляющих различное по своему характеру регулирование речного стока (суточное, недельное, сезонное, многолетнее) и находящихся как в стадии частичного первоначального заполнения, так и нормально эксплуатируемых в течение периода до 30–50 лет.

1.28. Характер и интенсивность гидродинамического воздействия водохранилища на берега существенно зависят, кроме того, от местоположения того или иного берега по длине водохранилища. Крупное равнинное водохранилище в этом отношении можно разделить на две зоны: *зону глубокого подпора*, характеризуемую большой глубиной и шириной водоема, сравнительно устойчивым положением уровня воды, минимальными уклонами водной поверхности, и *зону небольшого подпора*, характеризуемую меньшей глубиной и шириной водоема, более неустойчивым уровнем воды и повышенными уклонами водной поверхности. Граница между этими зонами приближенно может быть установлена путем анализа продольных профилей водной поверхности водохранилища в характерные периоды его эксплуатации: в период прохождения пика половодья, в период предельной сработки воды из водохранилища.

1.29. На каскадных водохранилищах при условии осуществления верхним гидроузлом суточного, недельного, сезонного (или даже многолетнего) регулирования речного стока зона небольшого подпора, в свою очередь, разделяется на три района.

Для *верхнего района* характерно влияние на гидрологический режим суточного и недельного регулирования стока вышерасположенным гидроузлом, что вызывает неустановившееся движение потока. Наиболее полно здесь выражено сезонное регулирование стока и наблюдаются максимальные скорости стокового течения. Зимний период отличается неустойчивостью ледового покрова. Нижняя граница участка определяется дальностью распространения волн попусков суточного регулирования, причем она устанавливается в период предполоводного уменьшения подпора, при наименьшем его влиянии.

Для *среднего района*, как и для верхнего, характерно преобладание неустановившегося движения потока, так как еще прослеживается влияние недельного регулирования стока верхним гидроузлом. Исчезнове-

ние колебаний уровня воды, связанных с недельным регулированием, является признаком окончания района. Нижняя граница этого района устанавливается в период предельного ослабления подпора в конце зимы.

Нижний район отличается установившимся движением потока и постепенным ослаблением стокового течения по длине района.

1.30. *К основным показателям, которые целесообразно учитывать* при гидрологическом районировании зоны небольшого подпора, относятся суточный размах колебаний ежечасных уровней воды, недельный и годовой размах колебаний средних суточных уровней воды. Эти показатели сравниваются с аналогичными показателями в зоне глубокого подпора, а также проводится анализ продольных уклонов водной поверхности водоема при различных режимах работы верхнего и нижнего гидроузлов и характерных значениях подпора водохранилища.

Выделенные показатели достаточно тесно связаны с важнейшими характеристиками гидрологического режима, влияющими на берега. Выбор их в качестве признаков районирования обусловлен сравнительной легкостью получения и простотой обработки необходимых для этого данных. В качестве дополнительного признака при районировании следует использовать некоторые морфометрические показатели долины, в которой размещается водохранилище, в частности высотные отметки поймы и надпойменных террас. Это дает возможность учесть положение различных характерных уровней воды в водоеме по отношению к геоморфологическим элементам долины. Иногда для этих же целей можно привлекать конфигурацию водохранилища в плане, так как она влияет на поперечное сечение и ширину русла, а следовательно, и на скорость стокового течения и интенсивность ветроволновых процессов.

1.31. Изменение гидрологической обстановки по длине зоны небольшого подпора оказывает заметное влияние на динамику и форму береговой зоны водоема.

В верхнем районе преобладает воздействие на берега стокового течения, что обусловливает формирование берегов эрозионного типа, отличительным признаком которых служит наличие бечевника. Располагаясь в интервале колебаний уровня воды, бечевники имеют вогнутую или близкую к прямолинейной форму профиля и сравнительно большую крутизну. В случае активной боковой эрозии они отступают вместе с берегом и имеют наименьшую ширину при наибольшей крутизне.

В среднем районе стоковое течение сохраняет еще до некоторой степени свою берегоформирующую роль, препятствуя отложению наносов в прибрежной зоне водоема и образуя русловые формы, переходные от бечевников к прибрежным отмелям, у которых нет еще достаточно четкого свала глубин, характерного для прибрежной отмели, или он появляется лишь временами в безледный сезон при ослаблении стокового течения.

В верхнем и среднем районах размыв берегов усиливается в периоды пропуска наибольших расходов воды через верхний гидроузел при условии высокого стояния уровня воды в водоеме. Наиболее неблагоприятная обстановка для устойчивости береговых склонов создается в многоводные годы в период половодья.

Для нижнего района характерно преобладание в размыве берегов воздействия ветровых волн; стоковое течение при благоприятных условиях может лишь несколько снижать аккумуляцию наносов на внешнем краю отмели. В связи с этим здесь формируются устойчивые прибрежные отмели, которым присуща более пологая поверхность и обычно четко отмечаемый в рельефе свал глубин, бровка которого располагается на глубине размывающего действия ветровых волн на дно.

1.32. На водохранилищах, расположенных вне каскада или первыми в каскаде, в пределах зоны небольшого подпора можно выделить два района: *район выклинивания подпора* и *район постоянного наличия подпора*. По характеру гидродинамического воздействия водоема на берега первый район до некоторой степени соответствует верхнему району каскадного водохранилища, а второй – нижнему району такого же водохранилища.

1.33. Строительство гидроузлов на реках вызывает резкое изменение природной, в особенности гидрологической обстановки не только выше, но и ниже плотины гидроузла, в его нижнем бьефе, что отражается здесь на характере и интенсивности переформирования берегов.

Под *нижним бьефом гидроузла* понимается весь нижележащий участок реки, подверженный различным режимным изменениям вследствие возведения гидроузла и зарегулирования стока. Характер и степень режимных изменений, в том числе и руслового процесса, определяются видом регулирования стока верхним гидроузлом, наличием и величиной подпора от нижележащего гидроузла. Нижние бьефы разделяются на подпертые (являющиеся верховьем нижеследующего водохранилища) и свободные. В отдельные периоды верховая часть подпертых нижних бьефов может не испытывать подпора или он здесь заметно ослабевает. Подпертый нижний бьеф соответствует зоне небольшого подпора каскадного водохранилища, характеристика которого представлена в пп. 1.28–1.31.

1.34. В условиях свободных нижних бьефов, как и на реках с естественным режимом, в качестве основного гидродинамического фактора развития берегов выступает стоковое течение. Размыву подвергаются главным образом берега, расположенные на вогнутых в плане участках; вблизи берегов продолжают формироваться бечевники.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГНОЗУ РАЗМЫВА БЕРЕГОВ ПРИ РЕШЕНИИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

2.1. Растущий интерес к прогнозной оценке динамики берегов рек, находящихся как в естественном, так и зарегулированном состоянии, обусловлен все более интенсивным освоением прибрежных земель, повышением их ценности, стремлением вовлечь в хозяйственное использование самые неудобные для этого территории из-за увеличивающегося дефицита свободных земель, усилением внимания к охране и рациональному использованию природной среды.

2.2. Составление прогноза размыва берегов необходимо для обоснова-

ния проекта создания водохранилища, проектов переноса, защиты, реконструкции или строительства сооружений в береговой зоне рек и водохранилищ, для планирования различных мероприятий с целью сохранения особо ценных прибрежных территорий и защиты от загрязнения реки или водохранилища.

2.3. Задачи прогноза размыва берегов, которые обычно приходится при этом решать, заключаются в следующем:

выявление процессов, которые будут участвовать в размыве береговых склонов и влиять на устойчивость сооружений; качественная оценка изменения их активности по сравнению с существующей;

определение предельных размеров берегоразрушений без указания срока их достижения;

расчет средних и максимальных размеров разрушения берегов на заданный срок;

расчет средних и минимальных сроков, в течение которых могут произойти берегообрушения определенных размеров.

2.4. В зависимости от задачи прогноза определяются его срок, требования к надежности, метод прогноза и необходимые исходные показатели.

2.5. Сроком прогноза размыва берегов может быть срок окупаемости капиталовложений на строительство и эксплуатацию сооружений, при котором последние считаются эффективными, срок службы возможных вариантов берегоукреплений и расположенных или планируемых на побережье сооружений, а иногда даже срок службы гидроузла, учитывая возможность заиления водохранилища.

2.6. Для выбора створа плотины гидроузла и проектных отметок характерных уровней воды в водохранилище выясняются общая направленность и ориентировочные предельные размеры деформации берегов на всем протяжении будущего водохранилища и в нижнем бьефе при различных вариантах расположения гидроузла и режима его работы.

2.7. Предлагается следующий порядок решения этой задачи для каждого из рассматриваемых вариантов местоположения и режима работы гидроузла:

гидрологическое районирование водохранилища и нижнего бьефа;

геолого-геоморфологическая типизация берегов;

составление прогноза динамики берегов.

2.8. К основным признакам, которые рекомендуется использовать при типизации берегов, относятся следующие:

генезис и возраст слагающих береговые склоны пород (слишком дробное разделение при этом не требуется);

прочность пород с разделением их по этому признаку на нескальные (несвязные и связные) и скальные;

относительная высота береговых склонов или высота тех их элементов, которые будут подвергаться деформации в течение прогнозного срока; при выделении интервалов высот следует ориентироваться на преобладающие высоты основных элементов речной долины (поймы, надпойменных террас и склонов водораздела); при этом основание бере-

гового склона устанавливается по морфологическому признаку или принимается соответствующим отметке того или иного характерного уровня воды в водоеме;

форма береговой линии: прямолинейная, выпуклая или вогнутая;

характер глубин вблизи берегов; по этому признаку берега разделяются, согласно п. 1.3. Руководства по методам исследований и расчетов перемещения наносов и динамики берегов при инженерных изысканиях (М.: Гидрометеоиздат, 1975. – 239 с.), на приглубые (уклон дна 0,03 и более) и отмелые (уклон дна 0,01 и менее); отмелые берега могут быть, кроме того, разделены в зависимости от ширины мелководной прибрежной акватории.

2.9. На более поздних этапах проектирования гидроузла, когда окончательно решаются вопросы переноса и защиты сооружений на побережье, спасения ценных земель, для отдельных участков возникает необходимость в составлении долгосрочных и краткосрочных (до 10 лет) прогнозов размыва берегов высокой надежности. На основе подобных прогнозов определяются целесообразность осуществления и в значительной степени вид и объем (размеры) берегозащитных и водоохранных мероприятий, последовательность и сроки их выполнения.

2.10. Аналогичные требования к прогнозу размыва берегов необходимо предъявлять при составлении проектов освоения береговой зоны рек и существующих водохранилищ. В данном случае надежность прогноза, очевидно, будет выше, поскольку изыскания проводятся в условиях, более близких к прогнозным.

2.11. Краткосрочные прогнозы размыва берегов повышенной надежности бывают необходимы на начальный период строительства гидротехнических сооружений в береговой зоне реки или водохранилища для планирования объемов и сроков производства некоторых видов работ.

2.12. При решении долговременных задач освоения побережья реки и действующего водохранилища прогнозы на длительные сроки должны периодически уточняться на основе новых данных о динамике берегов и гидрометеорологическом режиме указанных водных объектов.

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ И ПРОГНОЗУ БЕРЕГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА СВОБОДНЫХ РЕКАХ

Общие положения

3.1. В основу Рекомендаций положены некоторые закономерности взаимодействия речного русла и потока в период половодья. Внешним проявлением этого взаимодействия являются береговые деформации, приводящие к плановому смещению русла.

3.2. Под *береговыми деформациями* равнинных рек следует понимать отступание бровки берега под влиянием русловой эрозии и изменений, происходящих в толще береговых пород во время половодья.

3.3. Расчеты береговых деформаций по рекомендуемым ниже формулам могут быть произведены с любой заблаговременностью. В связи с

этим подход к определению понятий "краткосрочный прогноз" и "долгосрочный прогноз" в настоящих Рекомендациях носит условный характер и их выделение в качестве самостоятельных расчетных операций продиктовано практическими соображениями. Все рекомендуемые формулы, будучи построены на единой принципиальной основе, различаются между собой, как правило, по значениям вводимых числовых коэффициентов.

3.4. При необходимости составления прогноза отступания бровки береговых склонов на отдаленную перспективу (на 20–30 лет и более), помимо настоящих Рекомендаций, могут быть использованы Рекомендации по размещению и проектированию рассеивающих выпусков сточных вод (М.: Стройиздат, 1981. – 224 с.).

Расчеты береговых деформаций

3.5. Величина перемещения бровки берега X, м, за одно половодье в расчетном створе определяется по формуле

$$X = k_1 k_2 k_3 \frac{\rho_W}{\rho} \frac{(\bar{H} + h_1)}{(H + h)} (B - 2B_1), \qquad (1)$$

где k_1 – коэффициент асимметрии русла; k_2 – коэффициент размываемости берега; k_3 – коэффициент увлажнения грунтов берега; ρ_W, ρ – соответственно плотность воды (обычно $\rho_W = 1{,}0$ т/м) и грунта, т/м^3; $\bar{H}$ – средняя глубина русла, м; h_1 – высота пика половодья, м; H – наибольшая глубина, м; h – высота берега, м; B – полная ширина русла, м; B_1 – ширина части русла от линии наибольших глубин потока до размываемого берега, м.

Коэффициент ассиметрии русла определяется по формуле

$$k_1 = [B_1 / (B - B_1)]^2. \qquad (2)$$

Коэффициент размываемости берега рассчитывается по формуле

$$k_2 = \frac{1}{2h} [(h_1 - h_0) + (t_1 / t)(h_0 - h_2)], \qquad (3)$$

где h_0, h_2 – высота уровня воды соответственно при вскрытии ледяного покрова и по окончании половодья, м; t_1 – продолжительность подъема половодья от времени вскрытия ледяного покрова до наступления пика половодья, сут; t – продолжительность периода от вскрытия реки до окончания половодья, сутки.

На реках, где ледяной покров не образуется, параметр h_0 определяется как уровень, соответствующий началу половодья. В этом случае продолжительность подъема уровня t_1 и продолжительность всего периода половодья t следует измерять от фактического начала половодья.



Рис. 1. Схема поперечного профиля русла

Коэффициент увлажнения грунтов берега находится по формуле

$$k_3 = h_1 / h. \qquad (4)$$

При определении величины отступания бровки берега по формуле (1) за уровень отсчета различных параметров принят уровень воды 50%-ной обеспеченности в расчетном створе (рис. 1).

Величина плотности грунтов ρ в формуле (1) характеризует обычно среднюю плотность, полученную для всего берегового склона.

В формулах (1) и (3) параметры, учитывающие развитие половодья (h_0, h_1, h_2, t_1 и t), относятся к конкретному году. Вследствие этого формула (1) носит оценочный характер.

Расчеты береговых деформаций по формуле (1) ограничиваются условиями, когда $2B_1 < B$.

3.6. Для оценки средней многолетней бровки величины отступания берега $\bar{X}$, м/год, рекомендуется использовать формулу

$$\bar{X} = m B q \frac{\rho_w}{\rho} \frac{(\bar{H} + h_1)}{(H + h)} \qquad (5)$$

Параметр m представляет собой произведение вида

$$m = k_1 (1 - 2B_1 / B). \qquad (6)$$

Значения m приведены в табл. 1.

Параметр q представляет собой произведение коэффициентов k_2 и k_3, в которых все значения характерных уровней половодья и соответствующие им даты относятся к средним многолетним величинам, и может быть выражен следующим образом:

$$q = \frac{\bar{h}_1 [(\bar{h}_1 - \bar{h}_0) + \bar{t}_1 / t (\bar{h}_0 - \bar{h}_2)]}{2h^2}. \qquad (7)$$

Таблица 1

B_1 / B	m	B_1 / B	m
0,01	0,0001	0,26	0,059
0,02	0,0004	0,27	0,063
0,03	0,0009	0,28	0,066
0,04	0,0016	0,29	0,070
0,05	0,0024	0,30	0,073
0,06	0,0035	0,31	0,076
0,07	0,0048	0,32	0,079
0,08	0,0063	0,33	0,082
0,09	0,0080	0,34	0,084
0,10	0,0098	0,35	0,087
0,11	0,0119	0,36	0,088
0,12	0,0141	0,37	0,089
0,13	0,0165	0,38	0,090
0,14	0,0190	0,39	0,089
0,15	0,0217	0,40	0,088
0,16	0,0246	0,41	0,086
0,17	0,0270	0,42	0,083
0,18	0,0300	0,43	0,079
0,19	0,0340	0,44	0,074
0,20	0,0375	0,45	0,066
0,21	0,0400	0,46	0,058
0,22	0,0445	0,47	0,047
0,23	0,0480	0,48	0,034
0,24	0,0518	0,49	0,018
0,25	0,0556	0,50	0,000

3.7. Прогнозная средняя величина отступания бровки берега на заданный срок $X_п > M$ находится по формуле

$$X_п = m \; B \; T \; q \; \frac{\rho_w}{\rho} \; \frac{(\bar{H} + \bar{h}_1)}{(H + h)}, \qquad (8)$$

где T – период, годы.

Формулу (8) рекомендуется использовать для прогноза отступания бровки берега на срок от трех лет и на весь расчетный период эксплуатации возводимых в прирусловой зоне сооружений.

3.8. За период прогноза линия максимальных глубин может сместиться, что, в свою очередь, скажется на величине B_1. Учесть эти изменения можно введя в формулу (8) дополнительное выражение 2,6 B_1 / B. Тогда получим формулу для определения величины отступания бровки берега при долгосрочном прогнозе $X_{д.п.}$, м.

$$X_{д.п} = 2{,}6\ m\ B_1\ T\ q \frac{\rho_w}{\rho} \frac{(\bar{H} + \bar{h}_1)}{(H + h)}. \qquad (9)$$

3.9. При решении инженерных задач нередко возникает потребность в получении максимальной прогнозной величины отступания бровки берега за 1–2 года. В этих случаях расчеты необходимо произвести с учетом высоких половодий на реках. Такой учет достигается заменой в формуле (8) средней многолетней величины пика половодья $\bar{h}_1$ на максимальный наблюдавшийся уровень h_{max}. Тогда получим формулу для определения величины отступания бровки берега при краткосрочном прогнозе $X_{к.п}$, м

$$X_{к.п} = m\ B\ T\ q_1 \frac{\rho_w}{\rho} \frac{(\bar{H} + h_{max})}{(H + h)}. \qquad (10)$$

Параметр можно найти по формуле

$$q_1 = \frac{h_{max}\,[(h_{max} - \bar{h}_0) + (\bar{t}_1 / \bar{t})(\bar{h}_0 - \bar{h}_2)]}{2\,h^2}. \qquad (11)$$

3.10. На ранних стадиях проектирования, когда исходных данных для расчетов возможных береговых деформаций по формуле (8) еще недостаточно, приближенная величина отступания бровки берега на заданный срок $X_{п.п}$, м, может быть получена по следующей формуле:

$$X_{п.п} = 0{,}2\ m\ B\ T \frac{\bar{h}_1^2}{h^2} \frac{(\bar{H} + \bar{h}_1)}{(H + h)}, \qquad (12)$$

где $\bar{h}_1$ – высота пика половодья, численно равная высоте поймы.

Примеры расчетов

3.11. Расчеты произведены для участка крупной реки, развивающегося по типу свободного меандрирования. В пределах расчетного створа размыву подвергается вогнутый берег, относящийся к высокой пойме и сложенный рыхлыми суглинистыми породами. Берег имеет высоту до 6–7 м и круто обрывается в воду. Поверхность поймы вблизи берега относительно ровная, при половодьях редкой повторяемости она затапливается.

3.12. Для того чтобы дать заключение о возможных береговых деформациях, были получены и проанализированы следующие материалы:

карты – топографическая в масштабе 1:100 000 и лоцманская в масштабе 1:50 000;

результаты промеров глубин через все основное русло реки по расчетному створу, сопровождавшихся нивелировкой берегового склона;

сведения об уровенном режиме реки по ближайшему водомерному посту за 5 лет;

сведения о геолого-литологическом строении берега и физико-механических свойствах пород.

3.13. На основании анализа указанных материалов были получены исходные параметры (табл. 2), которые использовались для решения нескольких задач.

3.14. Первая задача заключалась в вычислении показателей отступания бровки берега за каждый из пяти предшествующих лет. Для этого использовалась формула (1). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

3.15. Вторая задача состояла в прогнозной оценке средней многолетней скорости размыва берега. Для ее решения была применена формула (5). В результате была получена средняя скорость береговых деформаций за 5 лет (см. табл. 3). В данном случае, учитывая отсутствие сведений об уровенном режиме за больший срок, эту величину можно рассматривать в качестве прогнозной средней многолетней.

3.16. Третья задача заключалась в установлении максимальной величины возможного размыва берега за год. С этой целью использовалась формула (10). При расчетах учитывался максимальный уровень воды в половодье за предшествующий период наблюдений. Он отмечен в третьем году (см. табл. 2). Результат также приведен в табл. 3.

Таблица 2

Годы	B	B_1	$B - B_1$	H	$\bar{H}$	h
1-й	600	100	500	10	6,6	6,0
2-й	600	100	500	10	6,6	6,0
3-й	600	100	500	10	6,6	6,0
4-й	600	100	500	10	6,6	6,0
5-й	600	100	500	10	6,6	6,0
Среднее значение параметра	600	100	500	10	6,6	6,0

Продолжение табл. 2

Годы	h_1	h_0	h_2	t_1	t	ρ
1-й	5	0	−1	43	100	1,75
2-й	4	−1	0	37	80	1,75
3-й	7	1	−2	40	110	1,75
4-й	5	2	−1	38	105	1,75
5-й	6	2	1	42	95	1,75
Среднее значение параметра	5,4	0,8	−0,6	40	98	1,75

Таблица 3

Расчетные параметры	Годы					Средние многолетние показатели
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	
k_1	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
k_2	0,45	0,38	0,59	0,34	0,37	0,42
k_3	0,83	0,66	1,16	0,83	1,00	0,90
$k_1\ k_2\ k_3$	0,015	0,01	0,027	0,011	0,015	0,015
q	0,37	0,25	0,68	0,28	0,37	0,39
q_1						0,66
ρ_W / ρ	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
$\bar{H} + h_1$, м	11,6	10,6	13,6	11,6	12,6	12,0
$H + h$, м	16	16	16	16	16	16
$H + h_{max}$, м	–	–	13,6	–	–	–
m	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
mB, м	16	16	16	16	16	16
X, м	2,48	1,51	5,23	1,81	2,69	2,74
$\bar{X}$, м/год	–	–	–	–	–	2,67
$X_{к.п}$, м	–	–	5,11	–	–	

4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОГНОЗУ РАЗМЫВА БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ

Этапы прогноза

4.1. Процедура прогноза ветроволнового размыва берегов (ВВРБ) включает в себя восемь этапов.

4.2. *Первый этап* состоит в обработке сведений об уровенном режиме для установления типа водохранилища, определения общих принципов учета влияния уровенного режима на ВВРБ и для получения отметок уровней воды заданной обеспеченности. Более подробно это рассмотрено в пп. 4.13–4.24; 4.48–4.53.

4.3. *Второй этап* заключается в получении волновых и волноэнергетических характеристик с использованием сведений о ветровом и уровенном режиме и батиметрической карты водохранилища. Операции этого этапа наиболее трудоемки и выполняются по методике, подробно рассмотренной в пп. 4.13–4.47, 4.63. При этом расчеты элементов волн в системе осуществляются по СНиП 2.06.04–82. В результате выполнения операций второго этапа получают следующие характеристики: среднюю высоту волны в метрах h_m; волноэнергетические показатели – удельную энергию волн, подходящих к прибрежной отмели N, Дж/год, ее нормальную N_d и продольную N_l составляющие, а также ту ее часть, которая определяет вдольбереговой поток наносов N_S; значение доли материала, перемещаемого по нормали от берега k_d. При необходимости средняя

высота волны и нормальная составляющая удельной энергии волн рассчитываются с учетом изменчивости уровня воды для уровней воды заданной обеспеченности, согласно рекомендациям пп. 4.13–4.24, 4.63.

4.4. На *третьем этапе* производится построение вспомогательного прогнозного профиля береговой зоны в соответствии с произвольно заданным положением бровки берега и положением характерных уровней воды, определяемых в зависимости от типа водохранилища (рис. 2, табл. 6–8).

Вначале на исходный (существующий) профиль берегового склона наносят заданное положение бровки будущего берега и вычерчивают профиль берега в соответствии с рекомендациями (см. пп. 4.54–4.60). Отметку основания берега (верхнего предела размыва ВПР) принимают равной отметке уровня воды той или иной обеспеченности, по табл. 8. Затем с чертежа снимают величину объема размытой породы V (в кубометрах с 1 м берега).

Для построения вспомогательного профиля береговой зоны подводной части определяют дополнительные показатели.

Коэффициент аккумуляции наносов на свале прибрежной отмели k_a можно вычислить в соответствии с рекомендациями, представленными в пп. 4.68–4.72. Для этого, кроме волноэнергетических показателей, требуются сведения о гранулометрическом составе слагающих берег пород, а при возможности также – средние значения плотности пород берега и наносов на свале отмели в сухом состоянии.

Объем аккумуляции наносов на внешнем краю отмели V_a, м^3 на 1 м берега, рассчитывают по формуле

$$V_a = k_a V, \qquad (13)$$

Для определения отметки бровки свала прибрежной отмели (нижнего предела размыва НПР) следует из отметки характерного уровня воды, определяемого в соответствии с рекомендациями (см. табл. 7 и 8), вычесть глубину на бровке свала отмели, рассчитываемую по формуле

$$d_m = 4{,}5\, h_m, \qquad (14)$$

где h_m – средняя высота волн при заданном уровне воды. Методика расчета h_m приведена в п. 4.63.

Угол наклона свала отмели φ_w принимают равным углу естественного откоса под водой для пород соответствующего литологического состава.

Используя все эти дополнительные показатели, можно легко подобрать путем пробных построений такой вспомогательный профиль подводной части береговой зоны, который будет удовлетворять следующим условиям: в пределах прибрежной отмели он будет иметь прямолинейную наклонную в сторону водоема форму и размещаться между отметками ВПР и НПР; по сравнению с исходным профилем он будет выдвинут в водоем настолько, чтобы объем аккумуляции наносов на внешнем краю отмели соответствовал расчетному значению V_a.

4.5. *Четвертый этап* заключается в определении времени формирования вспомогательного профиля в годах T.

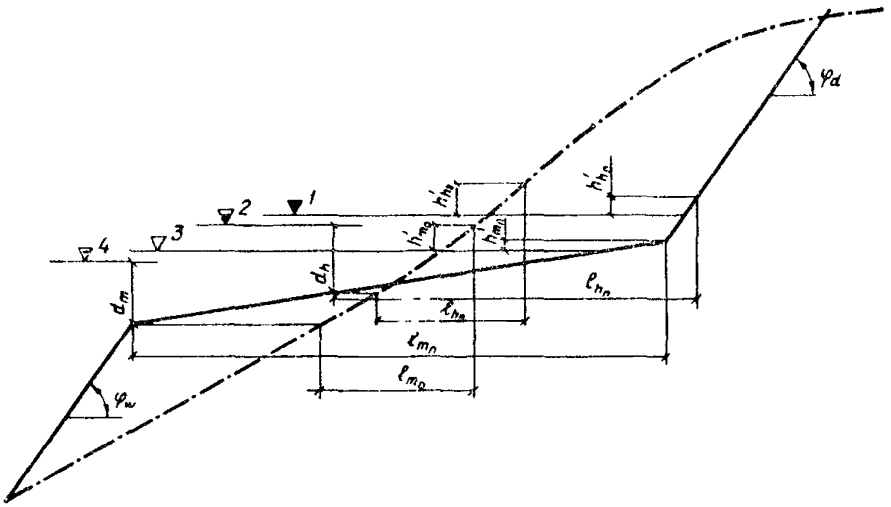


Рис. 2. Схема построения прогнозного (вспомогательного или искомого) профиля берегового склона; сплошная линия – начальное положение берегового склона; пунктирная линия – профиль склона на конец периода T; 1 – уровень воды для отсчета h'_n; 2 – уровень воды для отсчета d_n; 3 – уровень воды для отсчета h'_m; 4 – уровень воды для отсчета d_m.

На водохранилищах I и II типов, а также для вспомогательного профиля берега в условиях стояния низких уровней воды на водохранилищах III типа при расчете T следует пользоваться формулой

$$T = \frac{V \gamma k_d l_m^2}{N_d k_b l}, \qquad (15)$$

где γ – удельный вес пород с учетом взвешивающего влияния воды, Н/м^3; l_m – средняя ширина прибрежной отмели за период формирования вспомогательного профиля, м; k_b – коэффициент размываемости пород; l – эмпирическая постоянная, равная 0,06 м

Время формирования вспомогательного профиля берега на водохранилищах IV типа, а также в условиях стояния высоких и средних уровней воды на водохранилищах III типа можно рассчитывать по формуле

$$T = \frac{V \gamma k_d}{k_b l (N_h / l_h^2 + N_m / l_m^2}, \qquad (16)$$

где N_h и N_m – нормальные составляющие удельной энергии волн, подходящих к прибрежной отмели, соответственно при высоких и средних уровнях (для водохранилищ III типа) и при высоких и средних – низких

уровнях (для водохранилищ IУ типа), Дж/год; l_h и l_m – средняя за период Т ширина прибрежной отмели соответственно при высоких и средних уровнях воды (для водохранилищ III типа) и при высоких и средних – низких уровнях (для водохранилищ IУ типа); остальные обозначения те же, что и в формуле (15).

Удельный вес пород с учетом взвешивающего влияния воды γ вычисляют по формуле

$$\gamma = (\gamma_b - 9810)\frac{\gamma_v}{\gamma_b}, \qquad (17)$$

где γ_b и γ_v – удельный вес частиц породы и сухой породы определяют по данным непосредственных измерений или по нормативным данным с учетом геолого-литологического строения берегового склона.

Для выбора или расчета значения коэффициента k_b рекомендуется использовать данные табл. 4. При неоднородном строении берега среднее значение k_b вычисляют с учетом толщины слоев различных пород.

Таблица 4

Геолого-литологическая характеристика пород		k_b
Мелкий и тонкий песок	(a Q)	1,00
Крупный песок	(a Q)	0,38
Суглинок	(d Q)	0,20
Суглинок с валунами	(g Q)	0,14
Глина и мергель	(P; T)	0,10

При наличии фактических данных о размыве берега, аналогичного по своему геолого-литологическому строению берегу, для которого осуществляется прогноз, можно получить более точные осредненные значения коэффициента k_b путем обратных расчетов по формулам (15) и (16).

Среднюю за период Т ширину прибрежной отмели l_m, необходимую при расчетах по формулам (15) и (16), можно найти из выражения

$$l_m = 0{,}5\ (l_{m_0} + l_{m_n}), \qquad (18)$$

где l_{m_0} – первоначальная ширина отмели, снимаемая с исходного профиля берегового склона, а l_{m_n} – ширина отмели, снимаемая со вспомогательного профиля (см. рис. 2). Таким же способом следует рассчитывать l_n.

4.6. *Пятый* и *шестой этапы* сходны с третьим и четвертым. На пятом этапе производят таким же способом, как и на третьем, построение второго вспомогательного профиля берегового склона соответственно новому заданному положению бровки берега, а на шестом – расчет времени, необходимого для его формирования, по формулам (15) и (16). Если время формирования первого вспомогательного профиля получилось

меньше заданного срока прогноза, второй вспомогательный профиль размещают на чертеже дальше от исходного профиля с таким расчетом, чтобы искомый прогнозный профиль оказался между вспомогательными профилями. Если же время формирования первого вспомогательного профиля больше срока прогноза, то второй вспомогательный профиль размещают ближе к исходному профилю берега.

4.7. На *седьмом этапе*, имея для каждого вспомогательного профиля следующие данные: рассчитанное время его формирования T, снятый с чертежа объем размытой породы $V_и$ заданную величину отступания бровки берега S, строят графики $V = f(T)$ и $S = f(T)$ (рис. 3).

4.8. Завершающий *восьмой этап* состоит в том, что с помощью графиков рис. 3 определяют $V_п$ и $S_п$ на заданный срок прогноза и вычерчивают искомый прогнозный профиль берегового склона, соответствующий величинам $V_п$ и $S_п$, используя те же приемы, что и при построении вспомогательных профилей.

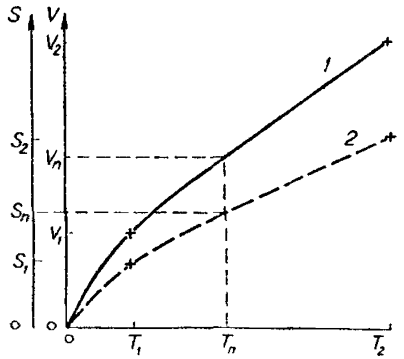
4.9. На водохранилищах II и III типов изложенную в пп. 4.1–4.8 процедуру прогноза выполняют дважды или даже трижды при различных положениях характерных уровней воды (см. пп. 4.13–4.24)

4.10. При долгосрочном прогнозе (более 10 лет) особенно в начале эксплуатации водохранилища при неоднородных геолого-геоморфологических условиях побережья рекомендуется выполнять прогнозные расчеты по нескольким поперечникам в пределах участка протяженностью не менее одного километра. Это необходимо делать даже в том случае, если в конечном счете требуется прогноз размыва берега на более коротком участке. Для повышения точности расчетов время прогноза при этом следует разбивать на ряд интервалов в зависимости от предполагаемой скорости изменения береговой линии, а также роста ширины прибрежной отмели. Прогноз необходимо производить последовательно для каждого интервала времени, учитывая положение береговой линии и прибрежной отмели на начало соответствующего интервала.

4.11. Рассматриваемая методика прогноза рассчитана на применение при формировании абразионного берега. Для того чтобы выяснить, не пойдет ли развитие берега по аккумулятивному пути, следует провести обследование участка и проанализировать гидрологические и геоморфологические материалы. Рекомендуется также сделать расчеты N_S для нескольких точек изучаемого побережья с целью определения направления и интенсивности вдольберегового потока наносов. На мысах и в вогнутостях береговой линии в случае движения потоков наносов друг другу навстречу их высокой интенсивности и наличия в составе пород, слагающих размываемое побережье значительного количества частиц крупнее 0,05 мм имеется основание предполагать, что здесь будет происходить не размыв берега, а рост аккумулятивных береговых форм. На повороте берега в залив образование аккумулятивных береговых форм возможно даже в случае преобладающего перемещения наносов вдоль берега от залива, что можно объяснить наличием вдольбереговой миграции наносов, при которой часть их перемещается в противоположном основному потоку наносов направлении.

4.12. При прогнозе размыва берегов в зоне небольшого подпора

Рис. 3. Вспомогательные графики
1 – V = f(T); 2 – S = f(T)



водохранилища в данную методику вносят дополнительные коррективы. В основном они касаются расчета коэффициента аккумуляции и построения вспомогательных и искомого прогнозных профилей береговой зоны с учетом характерных уровней воды (пп. 4.23, 4.24, 4.70). В верхнем районе зоны небольшого подпора размыв берегов происходит в основном за счет воздействия речного течения. При необходимости прогноза размыва берегов ветровыми волнами здесь выполняют по вышеприведенной методике, предполагая отсутствие затухания размыва и отсутствие аккумуляции наносов вблизи берега. Среднюю ширину прибрежной отмели за период Т принимают равной начальной ширине отмели.

Учет влияния уровенного режима водохранилища на размыв берегов

4.13. Исходные данные об уровнях воды для прогноза размыва берегов представляют в виде таблицы или графика повторяемости и обеспеченности суточных уровней воды (%) за безледный сезон. Эти данные получают обычно на основании многолетних наблюдений на ближайших водомерных постах Госкомгидромета или путем расчетов (из Проекта гидроузла). На водохранилищах с устойчивым уровнем воды в безледное время, когда размах его колебаний не превышает 4 м, обработку исходных данных рекомендуется выполнять с разбивкой уровней на интервалы через 0,4–0,5 м. При размахе колебаний более 4 м и относительно равномерном распределении уровней можно увеличить интервалы до 0,8–1,0 м.

4.14. Последующая операция заключается в разделении уровней воды на высокие, средние и низкие. К высоким относятся уровни обеспеченностью менее 25%, к средним – от 25 до 75% и к низким – большей обеспеченностью. Соответственно данному разделению в каждой из этих градаций среднюю отметку будут иметь уровни обеспеченностью 12,5, 50 и 87,5%.

4.15. Влияние колебаний уровня воды на ВВРБ учитывается, в первую очередь, в расчетах волновых и волноэнергетических характеристик (при крайних положениях уровня воды в безледное время за многолетие). При наличии мелководий с отметками поверхности, находящимися в зоне колебаний уровня воды в безледное время, подобные вычисления

производят еще для нескольких промежуточных положений уровня. Затем строят вспомогательные графики зависимости волновых и водноэнергетических характеристик от уровня воды. Пользуясь ими, можно определить значение той или иной из этих характеристик с учетом повторяемости по интервалам различных уровней воды отдельно для периодов стояния высоких, средних и низких уровней или для различных случаев их совмещения в зависимости от типа водохранилища (см. пп. 4.17–4.24). *Расчет следует производить по формуле*

$$X = (X_1 P_1 + \ldots + X_i P_i + \ldots + X_n P_n) / 100\%, \qquad (19)$$

где $X_1 \ldots X_i \ldots X_n$ – волновые и волноэнергетические характеристики, определенные при средних уровнях воды в различных интервалах; $P_1 \ldots P_i \ldots P_n$ – повторяемости уровней в тех же интервалах (%).

4.16. Влияние уровенного режима при прогнозе ВВРБ, кроме того, можно учесть путем раздельного определения средней за период Т ширины прибрежной отмели при тех или иных характерных уровнях воды в зависимости от типа водохранилища. Указанные средние значения ширины отмели необходимы для расчетов по основным прогнозным формулам (15) и (16).

4.17. По уровенному режиму в безледное время зоны глубокого подпора крупных равнинных водохранилищ разделены на три типа (табл. 5). Для каждого типа в табл. 6–8 представлены рекомендации по учету характерных уровней, выбору формулы для расчета времени формирования вспомогательных профилей, а также схемы построения вспомогательных и искомых прогнозных профилей береговой зоны.

4.18. К I типу отнесены водохранилища недельного регулирования и некоторые водохранилища сезонного регулирования, отличающиеся незначительными колебаниями уровня воды около отметки НПУ в безледный сезон (например, Нарвское, Иваньковское, Горьковское, Угличское водохранилища, см. табл. 5). На этих водохранилищах многолетний размах колебания уровня воды за безледное время, исключая редкие уровни, составляет менее 2 м. В таких условиях можно рекомендовать выполнение расчетов водновых и волноэнергетических характеристик при постоянном уровне, принимая за такой уровень обеспеченностью 50%. Для получения исходных данных об уровнях воды на существующих водохранилищах этого типа достаточно провести обработку фактических суточных уровней за период не более 2–3 безледных сезонов.

4.19. *К II типу отнесены преимущественно водохранилища сезонного* регулирования, характеризуемые более значительным, чем на водохранилищах I типа, размахом колебаний уровня в безледное время за многолетие. После ежегодного весеннего наполнения водохранилища до НПУ уровень в течение безледного сезона колеблется около НПУ или происходит его постепенное снижение, достигающее к концу сезона не более 0,5–3 м. Подобный уровенный режим имеют, например, Новосибирское, Волгоградское, Каховское, Куйбышевское, Воткинское и Камское

Таблица 5

Водохранилище	Характер регулирования стока	Многолетний размах колебания уровня воды (исключая редкие уровни) в безледное время, м	Величина колебания уровня в безледное время, м, с обеспеченностью			Сведения об уровенном режиме в безледный сезон
			< 25% (высокие уровни)	25–75% (средние уровни)	>75% (низкие уровни)	
Водохранилища I типа						
Нарвское	Недельный	0,8	0,2	0,2	0,4	Незначительные колебания уровня около НПУ
Иваньковское	Сезонный	1,2	0,4	0,3	0,5	То же
Горьковское	"	1,2	0,3	0,2	0,7	"
Угличское	"	1,6	0,6	0,4	0,6	"
Водохранилища II типа						
Новосибирское	"	2,6	0,4	0,5	1,7	Слабые колебания уровня около НПУ в течение всего периода или плавное небольшое снижение осенью
Волгоградское	"	3		0,4	1,6	Незначительные колебания уровня около отметки НПУ с небольшим понижением в конце периода в маловодные годы

Продолжение табл. 5

Водохранилище	Характер регулирования стока	Многолетний размах колебания уровня воды (исключая редкие уровни) в безледное время, м	Величина колебания уровня в безледное время, м, с обеспеченностью			Сведения об уровенном режиме в безледный сезон
			< 25% (высокие уровни)	25–75% (средние уровни)	>75% (низкие уровни)	
Каховское	Сезонный	4	0,75	0,85	2,4	В многоводный год стояние уровня вблизи отметки НПУ. В средний по водности год заполнение до НПУ с последующим небольшим понижением. В маловодный год уровень несколько ниже НПУ с небольшим понижением к концу периода
Куйбышевское	"	4	0,6	1,4	2	В многоводные годы стояние уровня около отметки НПУ. В другие годы снижение уровня на 1,5–3 м к концу периода
Воткинское	"	4,4	0,8	1,2	2,4	После заполнения до НПУ небольшие колебания
Камское	"	4,5	0,7	0,7	3,1	После заполнения до НПУ в многоводные годы снижение уровня почти не происходит, в средние по водности годы происходит снижение к

						концу периода до 0,5 м, а в маловодные годы – до 1,5–2 м
Рыбинское	Неполный многолетний	4,6	0,9	1,5	2,2	Наполнение весной до разных отметок со слабыми колебаниями уровня в течение всего периода или с плавным снижением уровня на 0,5 м к концу периода
			Водохранилища III типа			
Цимлянское	Многолетний	8	1,8	2,5	3,7	Ежегодное заполнение весной до различных отметок с плавным снижением уровня к концу периода на 3–3,5 м

Таблица 6

Уровни, учитываемые при определении верхнего предела размыва	Обеспеченность уровня в безледное время за срок прогноза, %, в зависимости от типа водохранилищ			
	I	II	III	IУ
Высокие	–	–	12,5	12,5
Средние	12,5	37,5	50	62,5
Низкие	–	87,5	87,5	62,5

водохранилища. Близкий к этому уровенный режим наблюдается на Рыбинском водохранилище, осуществляющем неполное многолетнее регулирование. Для указанных водохранилищ высокие уровни обычно близки к средним, а низкие уровни заметно отличаются от средних (см. табл. 5). Прогноз ВВРБ предлагается, как правило, выполнять раздельно для низких и для остальных уровней (см. табл. 6–8).

4.20. К III типу отнесены водохранилища многолетнего регулирования (например, Цимлянское), для которых характерен наибольший

Уровни, учитываемые при определении нижнего предела размыва	Обеспеченность уровня в безледное время за срок					
	I			II		
	Коффициент					
	$k_a \geqslant 0{,}5$	$0{,}2 < k_a < 0{,}5$	$k_a \leqslant 0{,}2$	$k_a \geqslant 0{,}5$	$0{,}2 < k_a < 0{,}5$	$k_a \leqslant \geqslant 0{,}2$
В начальной стадии формирования отмели:						
высокие	–	–	–	50	62,5	75
средние	50	75	99	87,5	99	99
низкие	–	–	–	87,5	99	99
В стадии формирования устойчивой отмели:						
высокие	–	–	–	75	75	75
средние	99	99	99	75	75	75
низкие	–	–	–	99	99	99

размах колебаний уровня воды за многолетие в безледное время. Эти водохранилища заполняются до НПУ неежегодно. После приема весеннего половодья и достижения максимальных уровней в течение остального безледного времени года происходит плавное снижение уровня. Водохранилища III типа имеют наиболее слабые различия в повторяемости уровней по интервалам в многолетнем разрезе. Как высокие, так и низкие уровни существенно отличаются от средних (см. табл. 5), поэтому при прогнозных расчетах ВВРБ следует учитывать отдельно высокие, средние и низкие уровни (см. табл. 6–8).

4.21. При прогнозе ВВРБ водохранилищ II и III типов воздействие волн при низких уровнях воды оценивается следующим образом. Принимая во внимание повторяемость низких уровней по интервалам или среднее их положение, соответствующее уровню обеспеченностью 87,5%, производится определение необходимых волновых и волноэнергетических характеристик. Затем выполняется прогноз ВВРБ отдельно при низких уровнях с построением соответствующих вспомогательных и искомого прогнозных профилей береговой зоны, согласно рекомендациям, представленным в табл. 6.

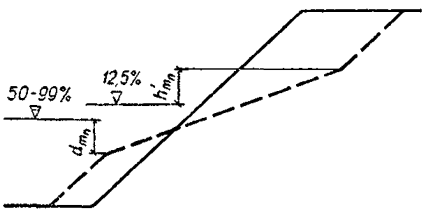
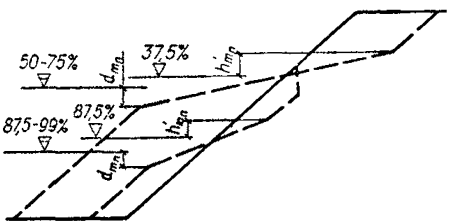
4.22. При прогнозе ВВРБ на водохранилищах III типа, особенно при краткосрочном, большое значение имеет составление прогноза уровенного режима по годам. Это позволяет более обоснованно выбрать порядок промежуточных операций прогноза ВВРБ при различных уровнях

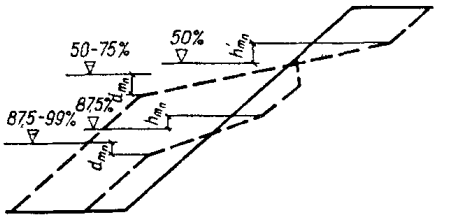
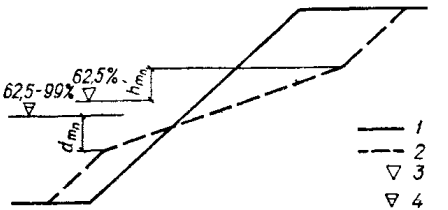
Таблица 7

прогноза, %, в зависимости от типа водохранилища

III			IV		
аккумутации					
$k_a \geqslant 0{,}5$	$0{,}2 < k_a < 0{,}5$	$k_a \leqslant 0{,}2$	$k_a \geqslant 0{,}5$	$0{,}2 < k_a < 0{,}5$	$k_a \leqslant 0{,}2$
12,5	25	25	12,5	25	25
50	62,5	75	62,5	87,5	99
87,5	99	99	62,5	87,5	99
25	25	25	25	25	25
75	75	75	99	99	99
99	99	99	99	99	99

Таблица 8

Тип уровенного режима	Уровни воды, учитываемые при расчетах времени формирования вспомогательных профилей					Схема построения прогнозных (вспомогательных или искомого) профилей берегового склона
	все низкие	средние и низкие	средние	высокие и средние	высокие	
	Номера формул, рекомендуемых для расчета времени формирования вспомогательных профилей					
I	15					
II	15		15			

III	15	16	16	
IУ		16	16	

Условные обозначения: начальное положение (1) и прогнозный профиль (2) берегового склона; уровни воды различной обеспеченности, учитываемые при определении положения основания берега (3) и бровки прибрежной отмели (4)

воды. Так, в одних случаях может оказаться целесообразным проведение расчетов ВВРБ при низких уровнях воды после или до соответствующего расчета при высоких и средних уровнях воды, если такой порядок ближе к предполагаемому изменению уровня воды по годам за срок прогноза. По этой же причине в других случаях более правильным может быть выполнение начального прогноза ВВРБ при низких уровнях воды с учетом половины приходящейся на них величины нормальной составляющей удельной годовой энергии волн. А размыв берега с учетом другой половины этой величины рекомендуется рассчитывать после построения прогнозного профиля береговой зоны, отражающего результат взаимодействия волн при высоких и средних уровнях воды.

4.23. Все изложенные выше рекомендации относятся к зонам глубокого подпора. Зона небольшого подпора водохранилища, особенно ее верхний и средний районы, согласно предложенному в п. 1.29 районированию, может существенно отличаться по своему уровенному режиму от зоны глубокого подпора этого же водохранилища. Поэтому здесь при прогнозе ВВРБ в каждом конкретном случае необходимо решать, к какому из выделенных типов по уровенному режиму относится данный район водохранилища. Выбранный тип уровенного режима и предлагаемые колебания уровня воды за срок прогноза определяют порядок учета влияния уровенного режима на ВВРБ.

4.24. К особому 1У типу по уровенному режиму отнесены верховья некоторых водохранилищ, в частности при расположении их вне или в начале каскада водохранилищ. Низкие уровни здесь в безледное время близки к средним, а высокие существенно отличаются от средних, что объясняется слабой зарегулированностью стока или отсутствием влияния подпора водохранилища в период прохождения половодья. В соответствии с особенностями уровенного режима при прогнозе ВВРБ рекомендуется вычислять время формирования вспомогательных профилей по формуле (16), причем при определении N_m и l_m следует принимать во внимание вместе средние и низкие уровни. Построение вспомогательных и искомого прогнозных профилей береговой зоны необходимо производить по табл. 6–8.

Расчет волновых и волноэнергетических характеристик

4.25. При расчетах волновых и волноэнергетических характеристик необходимо учитывать требования СНиП 2.06.04–82. Исходными материалами для расчета служат: батиметрическая карта водоема, таблицы (графики) повторяемости и обеспеченности (в процентах) уровня воды в водоеме за безледный сезон в характерные по водности годы или за многолетие и таблицы продолжительности действия ветра (в сутках) по восьми основным направлениям для интервалов скорости ветра (не более чем через 4 м/с) за безледный сезон за отдельные годы или за многолетние (осредненные данные за срок не менее 10 лет). Ветры со скоростью менее 3 м/с во внимание не принимаются. Скорость ветра вдоль линии разгона волн считается постоянной. Расчеты выполняют для точки, наме-

чаемой на внешнем краю прибрежной отмели, при том или ином заданном уровне воды.

4.26. Методика расчета элементов волн зависит от нахождения рассматриваемой акватории в глубоководной или мелководной зоне водоема. К глубоководной зоне относится часть акватории, где глубины составляют более половины средней длины волны и, следовательно, дно не влияет на основные характеристики волн. Глубоководные зоны могут находиться как в нижней части водохранилища, где отмечаются наибольшие глубины, так и в верховье водохранилища, где развитие волн ограничивают небольшие длины их разгона.

4.27. В условиях *глубоководной* зоны от точки расчета проводят волнообразующие направления через 22,5° до подветренного берега и по каждому из них измеряют длину разгона волн (в метрах). Для основных волнообразующих направлений (через 45°), которых в зависимости от конфигурации береговой черты бывает от трех до пяти, устанавливают степень сложности этой конфигурации. Согласно Руководству*, если $L_{max} / L_{min} \geqslant 2$, где L_{max} и L_{min} – соответственно длина наибольшего и наименьшего лучей, проведенных из расчетной точки в секторе ± 45° от направления ветра до пересечения с подветренным берегом, то конфигурация считается сложной.

4.28. В этом случае при расчетах элементов волн вычисляют эквивалентный разгон L_d по формуле

$$L_d = 0{,}27\ [L_0 + 0{,}85\ (L_1 + L_{-1}) + 0{,}5\ (L_2 + L_{-2})], \qquad (20)$$

где L_n ($n = 0; \pm 1; \pm 2$) – фактические разгоны по лучам, которые проводят из расчетной точки до пересечения с линией берега в направлениях $\theta = 22{,}5^\circ\ n$ от главного луча. Для основных волнообразующих направлений, составляющих с береговой чертой угол менее 22,5°, эквивалентный разгон рассчитывается по формуле

$$L_d = 0{,}27\ (L_0 + 0{,}85\ L_1 + 0{,}5\ L_2). \qquad (21)$$

Препятствия с угловым размером менее 22,5° не учитываются.

4.29. В соответствии со СНиП 2.06.04–82 для каждого из основных волнообразующих направлений для средней скорости ветра V_W в каждом интервале, вычисленной с поправкой на высоту над поверхностью воды k_Z и на способ измерения ветра k_ϕ (табл. 9), производится расчет средних значений высоты $\bar{h}$ и периода $\bar{\tau}$ волн. Расчеты выполняют с помощью графиков рис. 4 на основании безразмерной величины $g\,L / V_W^2$. Среднюю длину волн рассчитывают по формуле

$$\bar{\lambda} = 1{,}56\ \bar{\tau}^2. \qquad (22)$$

---

* Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения. – Л.: ВНИИГ, 1977. – 316 с.

Таблица 9

Высота измерения ветра над уровнем воды, м	k_Z	Скорость ветра по флюгеру, м/с	$k_{ф.}$
5	1,1	20	1,00
10	1,0	25	0,95
20 и более	0,9	30	0,92

Примечание. Для промежуточных значений высоты над уровнем воды и скорости ветра k_Z и $k_ф$ определяются по интерполяции с точностью до 0,01.

4.30. Полученные средние значения высоты и периода волн используют далее для расчета энергии волн в системе n_g, кДж,на один метр их фронта при заданной продолжительности ветра t, сут, по формуле

$$n_g = 33 \cdot 10^4 \bar{h}_1^2 \bar{\tau} t . \qquad (23)$$

4.31. Для ускорения расчетов в условиях глубоководной зоны построены для различных разгонов волн вспомогательные графики зависимости $\bar{h} = f(V_W)$ и $n_g = f(\bar{h})$ при продолжительности действия ветра 1 сут (рис. 5 и 6). В прил. 1 представлены исходные данные для составления этих графиков.

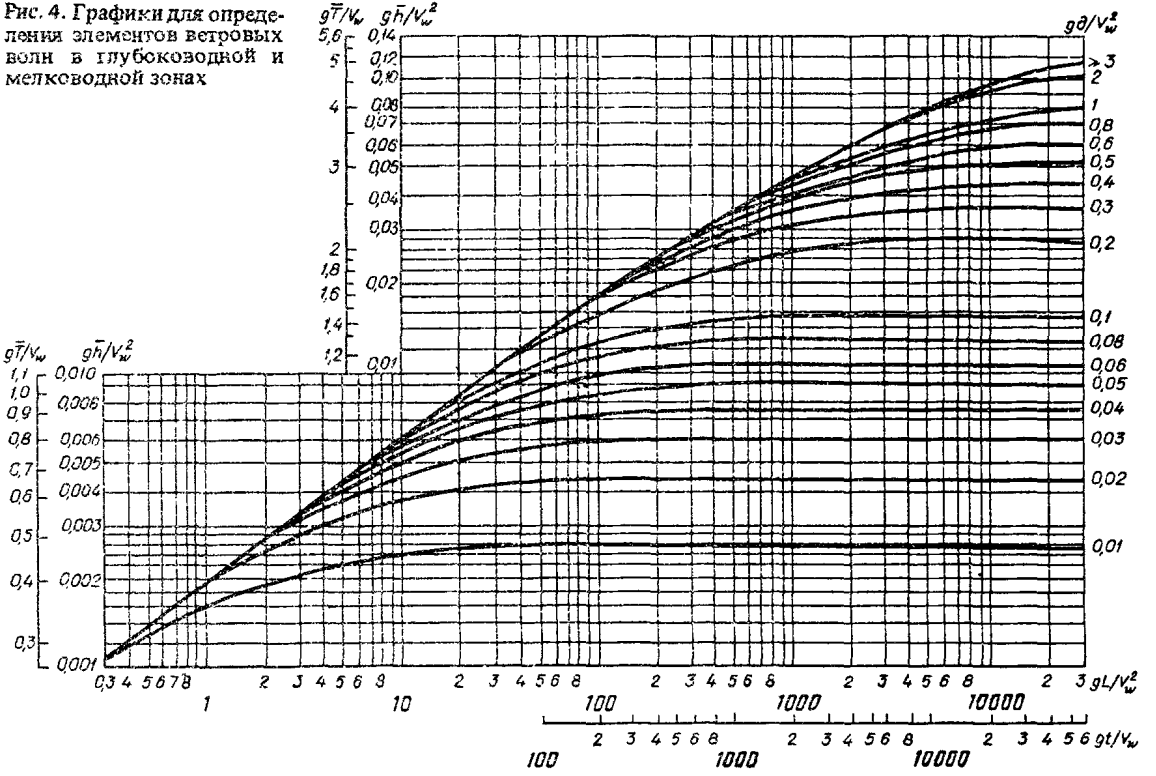
4.32. При наличии *мелководий* расчет средних значений высоты и периода волн в системе для заданной скорости и заданного направления ветра производится, согласно СНиП 2.06.04–82 и Руководству*, для случая минимального уклона дна.

4.33. При *простой конфигурации* береговой черты в условиях мелководий расчеты элементов волн по каждому основному волнообразующему направлению для той или иной скорости ветра производятся следующим образом. Вначале строят профиль дна и разбивают его на участки с близкими глубинами, для которых определяют среднюю глубину d и длину L (в метрах). Затем для первого самого дальнего от расчетной точки участка по безразмерным величинам $g d_1 / V_W^2$ и $g L_1 / V_W^2$ с помощью графиков (см. рис. 4) определяют значение $g \bar{h}_1 / V_W^2$ в конце первого участка. Далее, по полученному значению и безразмерной величине $g d_2 / V_W^2$, вычисленной для средней глубины на втором участке, определяют при помощи тех же графиков поправку $g \Delta L_2 / V_W^2$, прибавляемую к величине $g L_2 / V_W^2$, соответствующей второму участку.

---

* Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения. – Л.: ВНИИГ, 1977. – 316 с.

Рис. 4. Графики для определения элементов ветровых волн в глубоководной и мелководной зонах



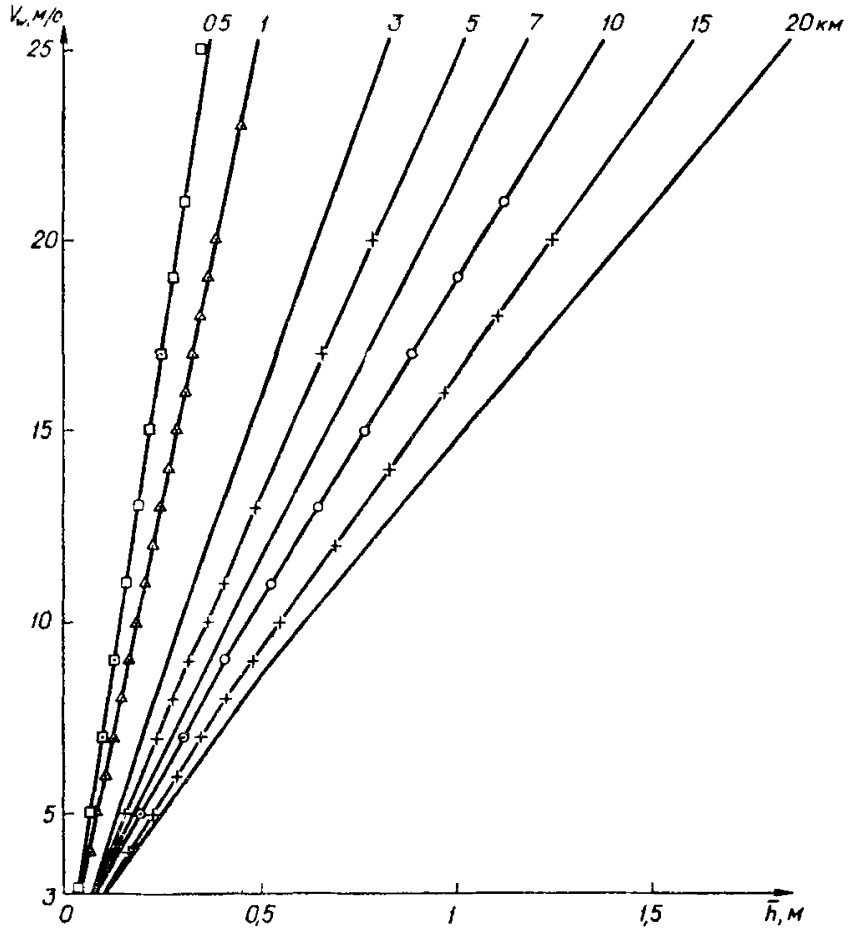


Рис. 5. Графики зависимости $\bar{h} = f(V_w)$ для различных разгонов волн

По полученной величине $g\,(\Delta L_2 + L_2) / V_w^2$ и величине $g\,d_2 / V_w^2$ определяют по тем же графикам значение $g\,\bar{h}_2 / V_w^2$ в конце второго участка. Аналогично вычисляют подобные значения для всех последующих участков, а для последнего участка с графиков (см. рис. 4) снимают не только значения $g\,\bar{h}_n / V_w^2$, но и значение $g\,\bar{\tau}_n / V_w$, а также определяют $\bar{h}$ и $\bar{\tau}$, которые представляют собой средние значения элементов волн в системе для заданного направления и скорости ветра в расчетной точке.

В остальном методика вычисления энергии волн в системе при заданной скорости ветра в мелководных зонах с простой конфигурацией береговой черты та же, что и для глубоководных зон. При этом можно воспользоваться и графиками $n_g = f(\bar{h})$ (см. рис. 6).

Однако в этом случае в качестве общей длины разгона волн принимают величину $\Delta L_n + L_n$, вычисляемую из выражения $g\,(\Delta L_n + L_n) / V_w^2$ для последнего участка.

4.34. В качестве примера выполним расчет элементов волн в системе при скорости ветра 5 м/с для профиля дна, разделенного на три участка.

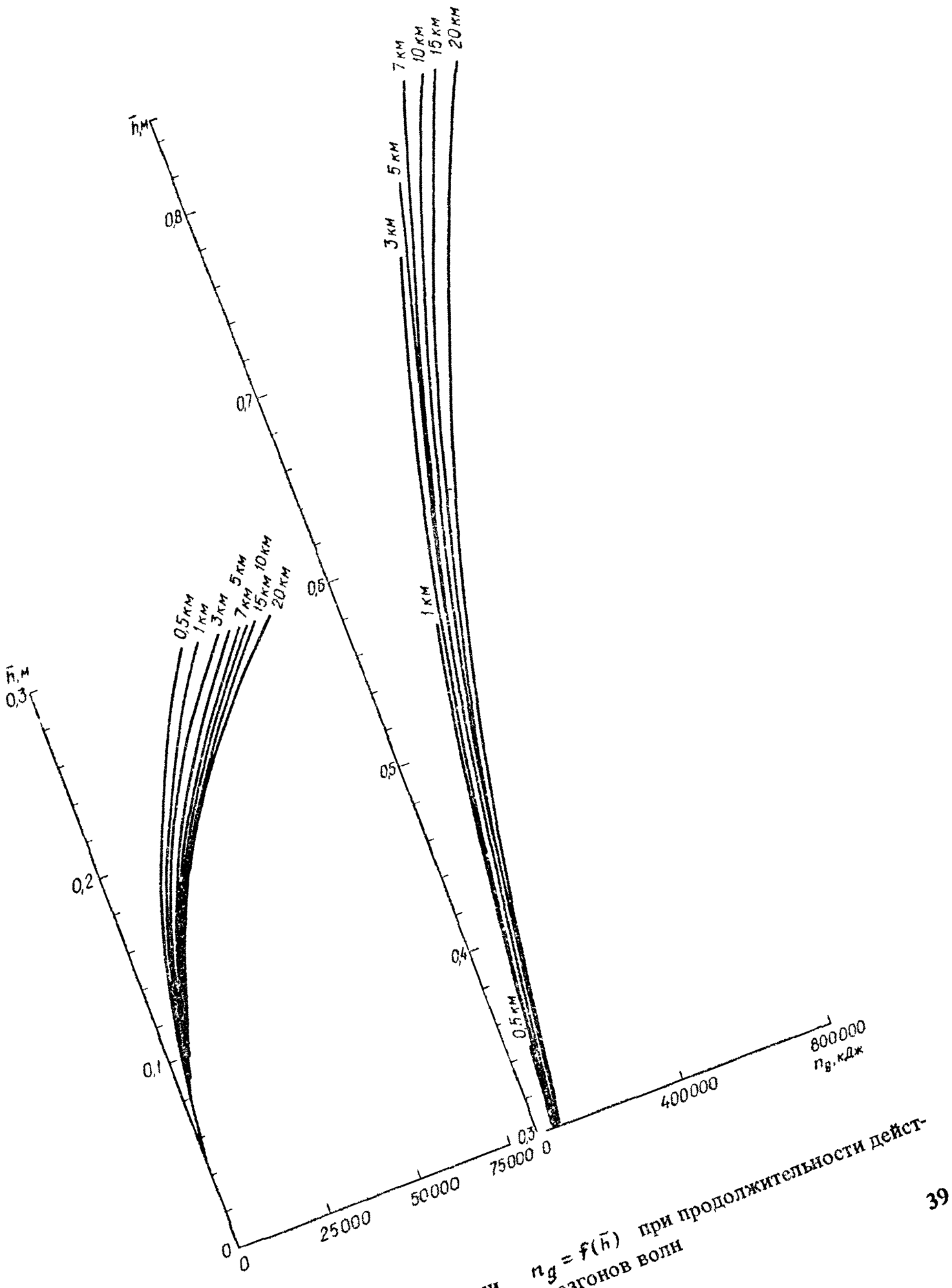


Рис. 6. Графики зависимости $n_g = f(\bar{h})$ при продолжительности действия ветра 1 сутки для различных разгонов волн

Первый (дальний) участок имеет длину L_1 = 3,5 км при средней глубине d_1 = 5 м, второй – L_2 = 3 км при d_2 = 2 м и третий – L_3 = 2,5 км и d_3 = = 8 м.

В соответствии с изложенными выше рекомендациями были произведены последовательно для каждого участка расчеты ряда безразмерных величин (табл. 10), что позволило в конечном счете определить для расчетной точки средние величины высоты и периода волн, составившие $\bar{h}$ = 0,17 м и $\bar{\tau}$ = 1,8 с.

Таблица 10

Участки	$g d / V_W^2$	$g L / V_W^2$	$g \Delta L / V_W^2$	$g (\Delta L + L) / V_W^2$	$g \bar{h} / V_W^2$	$g \bar{\tau} / V_W$
1-й	2,0	1370	–	–	0,052	–
2-й	0,8	1180	1650	2830	0,055	2
3-й	3,1	980	1600	2580	0,065	3,5

4.35. При *сложной конфигурации* береговой черты в мелководной зоне среднюю высоту волны $\bar{h}_d$ по каждому из основных волнообразующих направлений для той или иной скорости ветра можно вычислить по формуле

$$\bar{h}_d = 0{,}1 \left[25 \bar{h}_1^2 + 21 \left(\bar{h}_2^2 + \bar{h}_{-2}^2\right) + 13 \left(\bar{h}_3^2 + \bar{h}_{-3}^2\right) + 3{,}5 \left(\bar{h}_4^2 + \bar{h}_{-4}^2\right)\right]^{0,5}, \qquad (24)$$

где $\bar{h}_n$, м (при n = 1; ± 2; ± 3; ± 4) – средние высоты волн по главному лучу (основному волнообразующему направлению) и боковым лучам, проведенным из расчетной точки до пересечения с линией подветренного берега с интервалом ± 22,5° от главного луча. При этом расчеты средней высоты волны по главному лучу производят так же, как при простой конфигурации береговой черты. Отличие в расчетах по боковому лучу заключается в том, что значения длин участков с близкими глубинами, на которые разбивается профиль дна по боковому лучу, умножают на косинус угла, образуемого боковым и главным лучами, т.е. в расчетах учитывается длина проекции этих участков на главный луч.

Средний период волн $\bar{\tau}_d$ вычисляют по безразмерной величине $g \bar{\tau} / V_W$, которую можно определить (см. рис. 4) по известной безразмерной величине $g \bar{h}_d / V_W^2$.

Последующие расчеты величины энергии волн n_g в системе при заданной скорости и направлении ветра выполняют так же, как и при простой конфигурации береговой черты.

4.36. Методика определения *суммарных волноэнергетических характеристик* за один безледный сезон при заданном уровне воды как для глубоководной, так и для мелководной зон водохранилища одинакова.

Расчеты выполняют на основании величин энергии волн n_g в системе, полученных с помощью формулы (23) по основным волнообразующим направлениям для расчетных скоростей ветра с учетом продолжительности их действия. Ход вычислений понятен из табл. 11.

Вначале определяют величину энергии волн n по каждому волнообразующему направлению, приходящуюся на метр длины фронта волн. Затем производят пересчет этих величин на метр длины берега, умножая на синус угла подхода волн β к берегу.

В качестве угла β принимают наименьший угол по отношению к одной из сторон угла раскрытия берега (рис. 7). Угол раскрытия берега, по В.В. Дмитриеву, представляет собой центральный угол, соответствующий дуге окружности с центром в точке, для которой выполняются расчеты энергии, и с радиусом в 1–2 см, что обычно соответствует 250–1000 м в зависимости от масштаба карты. Дуга окружности размещается между точками пересечения окружности с общим направлением береговой черты, исключающим ее мелкую извилистость.

При выпуклой или вогнутой форме береговой черты для волнообразующего направления, которое и с той, и с другой сторонами угла раскрытия берега образует соответственно тупые или острые углы (на рис. 7 это углы β_c), энергию волн, приходящуюся на метр длины берега, можно рассчитывать по формуле

$$n_\beta = 0{,}5\, n\, (\sin\beta_1 + \sin\beta_2), \qquad (25)$$

где β_1 и β_2 – углы между волнообразующим направлением и сторонами угла раскрытия берега.

Сложив величины энергии волн n_β по отдельным направлениям, получим удельную энергию волн N, приходящуюся на метр длины берега.

Продольная составляющая удельной энергии волн, приходящаяся на метр длины, вычисляется по формуле

$$N_l = \Sigma\, n_\beta \cos^2\beta. \qquad (26)$$

Нормальную составляющую удельной энергии волн, приходящуюся на метр длины берега, определяют из выражения

$$N_d = N - N_l. \qquad (27)$$

Волноэнергетическую характеристику N_S, позволяющую судить о направлении и интенсивности вдольберегового потока наносов, вычисляют складывая продольные составляющие удельной энергии волн по отдельным направлениям с учетом их знака, указывающего, совпадают или нет они с направлением основного течения реки (см. табл. 11).

4.37. Волноэнергетические характеристики N, N_d и N_S можно использовать кроме того, для определения доли размываемого твердого материала, перемещаемого по нормали от берега k_d.

При коротком вдольбереговом потоке наносов, что обычно характер-

Таблица 11

Интервалы скорости ветра, м/с	Средняя скорость ветра в интервале с учетом поправок k_Z и k_ϕ, м/с	Волнообразующие направления								
		северное			северо-восточное			восточное		
		Высота волны $\bar{h}$, м	Продолжительность ветра в сутках, t	Энергия волн n_g, кДж	Высота волны $\bar{h}$, м	Продолжительность ветра в сутках, t	Энергия волн n_g, кДж	Высота волны $\bar{h}$, м	Продолжительность ветра в сутках, t	Энергия волн n_g, кДж
3–5	4	0,09	5,50	20 770	0,13	2,33	20 300	0,15	1,33	17 230
6–8	6,9	0,17	7,83	113 590	0,26	3,33	146 990	0,31	1,83	130 280
9–11	9,9	0,27	4,67	198 230	0,40	1,83	220 480	0,47	0,33	61 230
12–13	12.4	0,33	0.50	32 900	0,49	0,17	33 310			
Энергия волн по отдельным направлениям, n				365 490			421 080			208 740
Угол между линией разгона волн и берегом β				45°			90°			45°
$n_\beta = n \sin \beta$				258 400			421 080			147 580
Удельная энергия волн $N = \Sigma n_\beta$				827 060 кДж/год на метр длины берега						
$n_\beta \cos^2 \beta$				229 200			0			−73 770

Продольная составляющая удельной энергии волн $N_l = \Sigma\, n_\beta \cos^2 \beta$	202 970 кДж/год на метр длины берега
Нормальная составляющая удельной энергии волн $N_d = N - N_l$	624 090 кДж/год на метр длины берега
Удельная энергия волн, определяющая вдольбереговой поток наносов N_S	129 200 – 73 770 = 55 430 кДж/год на метр длины берега

Примечание. Знак минус означает, что поток наносов направлен против основного течения реки.

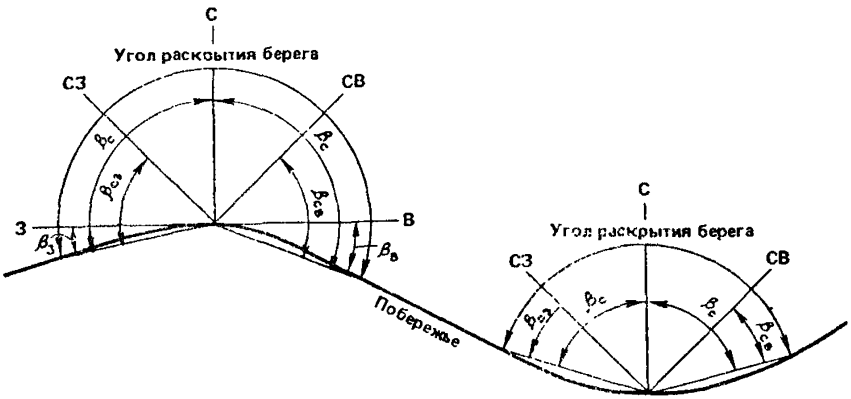


Рис. 7. Схема определения угла подхода волн к берегу

но для начального периода эксплуатации водохранилища в условиях изрезанности береговой черты,

$$k_{d_1} = N_d / N, \tag{28}$$

В начале длинного вдольберегового потока наносов

$$k_{d_2} = 2 N_d / (N + N_d + N_s). \tag{29}$$

При длинном вдольбереговом потоке наносов в зоне их транзита

$$k_{d_3} = N_d / (N_d + N_s). \tag{30}$$

Учет изменчивости волноэнергетических характеристик при краткосрочном прогнозе

4.38. Для долгосрочного прогноза ВВРБ ($T \geqslant 10$ лет) обычно достаточно использовать средние многолетние значения волноэнергетических характеристик, рассчитанные на основании обработки многолетних (не менее 10 лет) данных о ветре, так как изменчивость годовых значений этих характеристик уже практически не отражается на суммарной величине размыва берега за срок прогноза. Получаемая таким образом величина размыва берега теоретически должна быть близка к средней.

4.39. При краткосрочном прогнозе ВВРБ представляет практический интерес получение не только средней, но и других величин размыва берега с заданной малой обеспеченностью, поскольку они могут существенно отличаться от средней величины.

Изменчивость годовых значений волноэнергетических характеристик обусловлена зависимостью от их весьма непостоянных факторов: дейст-

вия ветра, положения уровня воды в водохранилище, продолжительности безледного сезона. Эти факторы можно считать независимыми один от другого. Следовательно, годовые значения волноэнергетических характеристик, как и средние многолетние их значения, вычисленные осреднением по двухлеткам, трехлеткам и т.д., можно относить к случайным и для получения на основе их значений волнознергетических характеристик, учитываемых при прогнозе ВВРБ, можно воспользоваться приемами математической статистики.

4.40. Первая задача, которая при этом решается, состоит в определении минимального числа исходных значений волноэнергетических характеристик, достаточного для статистической обработки, по формуле

$$n = \mu^2 \, k_V^2 \, / \epsilon^2, \qquad (31)$$

где μ – нормирующий член, характеризующий вероятность P_t; $k_V = \frac{\sigma}{\overline{X}}$ – коэффициент вариации, где σ – среднее квадратическое отклонение исходных значений волноэнергетической характеристики от среднего для данной ограниченной выборки и $\overline{X}$ – среднее значение волноэнергетической характеристики ограниченной выборки; ϵ – допустимое относительное отклонение среднеарифметического ограниченной выборки от среднеарифметического генеральной средней с заданной вероятностью P_t.

Значение ϵ может быть принято равным 0,1 или 0,15 с вероятностью P_t соответственно 0,95 и 0,9 при μ, равном соответственно 2 и 1,5.

4.41. Статистическая обработка исходных значений волноэнергетических характеристик должна начинаться с построения кривой их распределения. Если эта кривая будет симметричной, то значение той или иной волноэнергетической характеристики заданной обеспеченности, используемое при прогнозе ВВРБ, следует рассчитывать по формуле

$$X_n = \overline{X}_n + k \, \sigma, \qquad (32)$$

где k – числовой показатель, зависящий от заданной обеспеченности волноэнергетической характеристики; значения этого показателя, равные 0,67; 1,0; 2,0 и 3,0, соответствуют обеспеченности 50,0; 31,7; 4,6 и 0,3%.

4.42. В случае несимметричной формы кривой распределения исходные значения волноэнергетической характеристики располагаются в порядке их убывания и для каждого из них рассчитывается обеспеченность по формуле

$$P_m = \frac{m - 0{,}3}{n + 0{,}4} \, 100\%, \qquad (33)$$

где n – общее число исходных значений, m – порядковый номер рассматриваемого исходного значения.

Затем вычерчивается на клетчатке вероятностей эмпирическая кривая обеспеченности этой характеристики. К полученной эмпирической кривой обеспеченности тем или иным из известных способов* подбирается теоретическая кривая. С помощью теоретической кривой, наиболее соответствующей эмпирической, можно определить значение волноэнергетической характеристики заданной малой обеспеченности выходящей за пределы эмпирической кривой.

4.43. При прогнозе ВВРБ на 1 год следует использовать годовые значения волноэнергетической характеристики заданной малой обеспеченности, определяемые по кривым распределения или обеспеченности. Для прогноза на более длительный срок (от 2 до 10 лет) имеющиеся годовые значения волноэнергетической характеристики обрабатывают в зависимости от срока прогноза соответственно по скользящим двухлеткам, трехлеткам и т.д., т.е. вычисляют средние значения за два, три и т.д. смежных года с последовательным смещением на один год по всему ряду. Таким способом получают ряд исходных средних многолетних значений волноэнергетической характеристики. Дальнейшая статистическая обработка этого ряда значений с целью определения среднего многолетнего значения волноэнергетической характеристики заданной малой обеспеченности аналогична изложенной выше.

4.44. Учитывая в целом затухающий характер размыва берега, краткосрочные прогнозы имеют наибольшую практическую ценность в первоначальный период после заполнения водохранилища. В связи с этим при расчетах годовых значений волноэнергетических характеристик в достаточном количестве приходится использовать данные о ветре, полученные частично или полностью до создания водохранилища, а для оценки в эти же годы применительно к условиям водохранилища уровенного режима и продолжительности безледного сезона применять расчетные приемы или метод аналогии, что, естественно, снижает надежность конечных результатов.

4.45. При долгосрочном прогнозе в отдельных наиболее ответственных случаях для повышения надежности расчета средней величины размыва берега целесообразно также использовать изложенную выше методику для получения годового значения волноэнергетической характеристики 50%-ной обеспеченности взамен ее среднего многолетнего значения.

4.46. При прогнозных расчетах, выполняемых с учетом изменчивости волноэнергетических характеристик, для определения величины размыва малой обеспеченности значение коэффициента k_d являющегося производным от волноэнергетических характеристик (см. формулы 28–30), должно быть взято соответствующей обеспеченности. При этом исходные значения k_d должны быть расположены в возрастающей последовательности.

4.47. Для примера расчета по изложенной методике в качестве начальных данных взят двенадцатилетний ряд рассчитанных годовых значений

---

* Самохин А.А., Соловьева Н.Н., Догановский А.М. Практикум по гидрологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 262 с.

энергии волн N, тыс. кДж, 1460, 800, 670, 1720, 1920, 1560, 1540, 840, 450, 1360, 1700, 1450.

Поставлена задача – определить среднее многолетнее значение указанной характеристики обеспеченностью 0,3% за три года.

В результате осреднения значений начального рода по скользящим трехлеткам был получен новый исходный ряд средних многолетних значений энергии волн N_j, состоящий из десяти величин (табл. 12).

Таблица 12

m	N_j	$k_j = N_j/\bar{N}$	$\Delta N_j = N_j - \bar{N}$	ΔN_j^2	ΔN_j^3	$P_m = \frac{m-0,3}{n+0,4} \times 100\%$
1	1730	1,36	462	213 444	98 611 128	6,73
2	1670	1,32	402	161 604	64 964 808	16,35
3	1500	1,18	232	53 824	12 487 168	25,96
4	1440	1,14	172	29 584	5 088 448	35,58
5	1310	1,03	42	1762	74 088	45,19
6	1170	0,92	–98	9684	–941 192	54,81
7	1060	0,84	–208	43 264	–8 998 912	64,42
8	980	0,77	–288	82 944	–23 887 872	74,04
9	940	0,74	–328	107 584	–35 287 552	83,65
10	880	0,69	–388	150 544	–58 411 072	93,27
$n = 10$	$\bar{N} = 1268$			Σ 854 158	Σ 53 699 040	

Затем были вычислены основные параметры эмпирической кривой распределения величин этого ряда $\bar{N}$, k_V, k_S (табл. 12 и 13).

Проверка данного ряда с использованием формулы (33) при $\epsilon = 0,15$, $\mu = 1,5$ и $P_t = 0,9$ показала его достаточность для статистической обработки, так как $n = 4$, а имеющийся ряд состоит из большего количества членов (из десяти).

Далее, учитывая несимметричность кривой распределения значений N_j, для каждого из них при расположении в убывающем порядке была рассчитана эмпирическая обеспеченность P_m по формуле 33 (см. табл. 12).

Результаты были использованы для построения в клетчатке вероятностей Бровковича эмпирической кривой обеспеченности, к которой была подобрана на основании таблицы С.И. Рыбкина* по параметрам $k_V = 0,24$ и $k_S = 2\ k_V$ теоретическая биноминальная кривая Пирсона III типа (рис. 8). Значение $k_S = 0,2$, вычисленное на основании эмпирических дан-

---

* **Лебедев В.В.** Гидрология и гидрометрия в задачах – Л.: Гидрометеоиздат, 1961. – 700 с.

Таблица 13

Основные параметры эмпирической кривой распределения N_j	Ошибки в расчетах основных параметров, %
$\bar{N} = 1268$	$\epsilon_{\bar{N}} = \frac{100\, k_V}{\sqrt{n}} = 7{,}6$
$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma \Delta N_j^2}{n-1}} = 308$	$\epsilon_{k_V} = \sqrt{\frac{1 + k_V^2}{2n}}\ 100 = 23$
$k_V = \frac{\sigma}{\bar{N}} = 0{,}24$	
$\mu_3 = \frac{1}{n-1} \Sigma (N_j - \bar{N})^3 = 5\,966\,560$	$\epsilon_{k_S} = \frac{\sqrt{\frac{6}{n}(1 + 6\, k_V^2 + 5\, k_V^4)}}{k_S} \times$ $\times 100 = 452$
$k_S = \frac{\mu_3}{\sigma_3} = 0{,}20$	

ных, из-за большой ошибки (452%, см. табл. 13) невозможно было применить для подбора указанной кривой. С помощью полученной теоретической кривой было установлено значение модульного коэффициента k_j величины N_j обеспеченностью 0,3%, равное 1,76, и определено соответствующее ему среднее многолетнее значение $N_j = k_j \bar{N} =$ 2232 тыс. кДж.

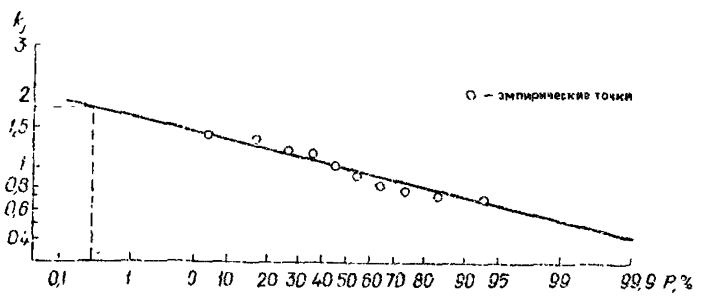


Рис. 8. Пример построения кривой обеспеченности коэффициента k_j

Предложения по прогнозу в период начального заполнения водохранилища

4.48. Прогноз ВВРБ для указанного периода представляет наибольший практический интерес на участках, где в соответствии с ожидаемой природно-техногенной обстановкой имеются предпосылки к интенсивному развитию абразии.

4.49. Прогнозные расчеты ВВРБ следует выполнять, исходя из проектного графика наполнения водохранилища и учитывая уровни воды с наибольшей повторяемостью (иногда средние) по каждому году наполнения или за весь период начального заполнения (и в том, и в другом случае за безледное время).

4.50. При длительном заполнении водохранилища прогноз, как правило, должен производиться в несколько приемов, принимая за начальный профиль берега для каждого последующего расчета прогнозный профиль, полученный в результате предыдущего расчета.

4.51. Для целей прогноза ВВРБ желательно иметь детальный проектный график изменения уровня воды. Практика показывает, что по разным причинам этот график в процессе наполнения водохранилища обычно нарушается, поэтому следует делать прогнозные расчеты для нескольких вариантов наполнения водохранилища и в дальнейшем ориентироваться на тот вариант, по которому получается наибольшая величина размыва берега, принимая во внимание, что результаты такого краткосрочного прогноза необходимы главным образом для предотвращения катастрофических разрушений сооружений, своевременной их защиты или переноса.

4.52. Вычисление волноэнергетических характеристик при прогнозе ВВРБ следует производить, опираясь на данные о ветре за отдельные годы, по методике, изложенной в пп. 4.25–4.47, с целью получения не только их средних многолетних, но и максимальных прогнозных величин любой заданной обеспеченности.

4.53. Закончив прогнозные расчеты для условий начального наполнения водоема, приступают к прогнозу при нормальной его эксплуатации. При этом первоначальным профилем берега считается тот, который получится при прогнозе на конец начального периода заполнения водохранилища.

Построение прогнозного профиля берега

4.54. Для построения профиля берега следует применять расчетные инженерно-геологические методы или метод аналогии.

4.55. Для применения расчетных методов необходимо иметь такие характеристики физико-механических свойств пород, как показатель сопротивления сдвигу, сила сцепления, угол внутреннего трения, плотность. Расчеты дают возможность определить предельный угол устойчивого откоса. Надежные результаты можно получить лишь при простом геологическом строении склона. Недостатки расчетных методов свя-

заны с погрешностью определения свойств пород, сложностью, а иногда и невозможностью учета изменчивости свойств пород в массиве, трудоемкостью расчетов. Если имеются данные о сопротивлении пород сдвигу, то можно употреблять метод равнопрочного откоса, предложенный Н.Н. Масловым*. Этот метод основан на предположении, что угол устойчивого откоса для любой породы есть угол сопротивления ее сдвигу. Преимущества метода – в небольших затратах времени на расчет, в возможности прогноза (хотя и приближенного) формы откоса сложного геологического строения.

4.56. При использовании метода аналогии, который чаще применяется для этих целей, предполагается, что прогнозируемая форма откоса подобна форме существующих наиболее крутых откосов, имеющих сходное с рассматриваемым геолого-литологическое строение. Как правило, аналоги подбирают в том же районе, где находится изучаемый берег. На существующих водохранилищах чаще всего прогнозному профилю берега придают форму, которую берег имеет в настоящее время.

4.57. Для успешного применения метода аналогии очень важно иметь правильные представления о механизме деформации берега, влиянии на устойчивость берега его высоты и свойств слагающих его пород. Следует иметь в виду, что порода, находящаяся в коренном залегании, в зависимости от ее свойств, среди которых большое влияние имеет влажность, может удерживать тот или иной откос предельной крутизны и определенной высоты. Когда высота больше, то профиль берега приобретает более сложную форму. В верхней части отмечается, как правило, крутая, нередко вертикальная стенка. При подмыве берега периодически образуется крутой уступ непосредственно над урезом воды. По достижении им предельной высоты происходит обрушение берега в виде осыпи, обвала или оползня. Нижняя часть берега приобретает более пологий уклон. Затем начинается формирование нового крутого уступа в основании берега. Наиболее сложными очертаниями обладает откос, сложенный различными сильно отличающимися по своим свойствам породами.

4.58. Для построения прогнозных профилей активно размываемых берегов можно воспользоваться данными табл. 14, корректируя их с учетом фактических в рассматриваемом районе. С помощью этих данных можно построить устойчивый профиль берегового откоса, образующийся после его подмыва и обрушения.

4.59. На более поздних этапах развития абразионного берега, когда темпы размыва существенно замедляются, в изменении профиля берега все отчетливее прослеживается тенденция к его выполаживанию за счет действия склоновых процессов. Берег в целом приобретает более простую сглаженную форму, поэтому при долгосрочном прогнозе, когда предполагается к концу срока прогноза образование слабо деформирусмого берега, форма откоса принимается одинаковой с первоначаль-

---

* Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. – М.: Высшая школа, 1968. – 629 с.

Таблица 14

Геолого-литологическая характеристика пород	Высота крутой части откоса, м	Угол наклона, град		
		крутой части откоса	пологой части сухого откоса	пологой части влажного откоса
Глинисто-мергелистая толща пермского возраста	–	–	36–48	–
Четвертичные отложения:				
глина	10–15**	–	До 50**	5–10**
лесс	5–9**	До 90**	38–40**	18–20**
суглинок с валунами	До 13	52–65	35–40	–
суглинок	7**	–	До 45**	15–20**
супесь	3–7**	–	35–40**	20–22**
песок:				
тонкий	4–5	71–77	35–40	20**
мелкий	До 3**	61–64	32–40	23**
средний	До 3**	61–64	32–40	26**
крупный	–	–	35**	26**
гравийно-галечные отложения	–	–	30*	–
щебенка коренных пород	–	–	33*	–

* І. Е.К. Гречищеву (Формирование берегов ангарских водохранилищ – Новосибирск: Наука, 1976. – 72 с.)

** II. Е.Г. Качугину (Рекомендации по изучению переработки берегов водохранилищ.– М.: Госгеолтехиздат, 1959, с. 3 – 89.)

ной до создания водохранилища (если в то время откос не подвергался активному разрушению) или аналогичной с формой природных откосов, находящихся в сходных условиях.

4.60. В особо ответственных случаях, когда при прогнозе важно определить не только величину размыва берега, но и форму берегового откоса, возникающую в результате размыва, степень устойчивости откоса должна оцениваться на основании соответствующих расчетов и специаль-

ных исследований свойств пород или даже с помощью лабораторного физического моделирования откосов.

Расчет высоты наката волн

4.61. При углах наклона зоны наката $\leqslant 34^{\circ}$ расчет высоты наката волн для краткосрочного прогноза ВВРБ в начале эксплуатации водохранилища следует вести по формуле

$$h'_m = 5{,}0\, k_r\, h_m\, \mathrm{tg}\, \alpha, \qquad (34)$$

где k_r – коэффициент шероховатости откоса, h_m – средняя высота волн, α – угол наклона зоны наката.

4.62. Коэффициент шероховатости откоса принимается, по Н.Н. Джунковскому*, для песков с диаметром частиц – 1,5–2 мм, равным 0,775, а для крупного рваного камня – равным 0,77.

4.63. Средняя высота волн h_m определяется для заданного характерного уровня воды по вспомогательному графику зависимости высоты волны от уровня воды $h_m = f(h_l)$. Для каждого расчета требуется составлять свой график.

Высота волны h_m при том или ином уровне воды h_l для построения данного графика вычисляется следующим образом. Вначале из таблицы расчета суммарных волноэнергетических характеристик при заданном уровне воды (см. табл. 11) выписываются высоты волн h в порядке возрастания независимо от волнообразующего направления и соответствующие им величины энергии n_g. Затем величины энергии последовательно складывают нарастающим итогом. Высота волны $\bar{h}$, которой соответствует половина всей суммы этой энергии, принимается за искомую величину h_m при данном уровне воды h_l. Пример расчета приведен в табл. 15.

4.64. Угол наклона зоны наката для расчета начальной высоты наката волн необходимо брать равным углу наклона фактической прибрежной отмели или углу наклона исходного берегового склона в интервале от расчетного уровня, учитываемого при определении верхнего предела размыва (см. табл. 6), до расчетной глубины на бровке отмели, определяемой по формуле (14) и отсчитываемой от уровня воды согласно табл. 7.

4.65. Для построения вспомогательного или искомого профиля сначала используют начальную высоту наката волн, а затем, снимая с профиля уточненное значение угла α, производят повторный расчет по формуле (34) и в случае значительных расхождений исправляют отметку основания берега на профиле.

4.66. При углах наклона $\alpha > 34^{\circ}$ начальную высоту наката волн при

---

* Пышкин Б.А. Динамика берегов водохранилищ. – Киев: Наукова думка, 1973. – 413 с.

Таблица 15

Высота волны h по всем волнообразующим направлениям, м	Энергия волн n_g, соответствующая продолжительности действия ветра t и высоте волны h, кДж	Величина энергии волн, полученная последовательным сложением величины n_g, кДж
0,05	11 960	11 960
0,06	16 990	28 950
0,11	53 940	82 890
0,12	50 000	132 890
0,17	15 160	148 050
0,18	11 960	160 010
0,23	2050	162 060
0,24	1780	163 840

$$h_{in} = 0{,}06 + (0{,}11 - 0{,}06)\ (0{,}5 \cdot 163\,840 - 28\,950)/53\,940 = 0{,}11 \text{ м}.$$

прогнозе ВВРБ можно вовсе не учитывать, так как она фактически не влияет на расчетные размеры ширины отмели. Подобными расчетами можно пренебречь и при углах $\alpha < 34^{\circ}$ в случае построения вспомогательного или искомого профиля при долгосрочном прогнозе или в условиях длительно эксплуатируемых водохранилищ, когда высота наката волн незначительна.

4.67. Применительно к излагаемой методике прогноза ВВРБ наиболее важен расчет начальной высоты наката волн, влияющий на ширину начальной отмели. Для последующих построений вспомогательного или искомого профиля берега расчет высоты наката волн представляется второстепенным. Результаты этого расчета практически не влияют на показатели ВВРБ, так как высота наката волн невелика и уменьшается по мере увеличения ширины и выполаживания прибрежной отмели.

Расчет коэффициента аккумуляции

4.68. Под коэффициентом аккумуляции k_a в данном случае понимается отношение объема отложенных на свале отмели наносов к объему размыва берега.

4.69. В условиях глубокого подпора водохранилища при отсутствии стоковых течений расчет коэффициента аккумуляции рекомендуется производить по одной из следующих формул:

а) при коротком вдольбереговом потоке наносов, что обычно характерно для начального периода эксплуатации водохранилища при изрезанности береговой черты,

$$k_a = (1 - \mu_b - \mu_s) \frac{N_d}{N}, \qquad (35)$$

где μ_b и μ_s – доля частиц диаметром соответственно более 0,5 мм и менее 0,05 мм в составе размываемых пород; N и N_d – соответственно вся удельная энергия волн, подходящих к отмели, и нормальная ее составляющая, кДж/год на 1 м длины берега;

б) в начале длинного вдольберегового потока наносов (зона дефицита наносов)

$$k_a = (1 - \mu_b - \mu_s) \frac{2 N_d}{N + N_d + N_s}, \qquad (36)$$

где N_s – удельная энергия волн, определяющая вдольбереговой поток наносов, кДж/год на 1 м длины берега; в случае увеличения или уменьшения энергии волн N_s в направлении потока наносов протяженность зоны дефицита наносов может быть соответственно увеличена или уменьшена;

в) при длинном вдольбереговом потоке наносов в зоне их транзита

$$k_a = (1 - \mu_b - \mu_s) \frac{N_d}{N_d + N_s}. \qquad (37)$$

Расчет k_a на начало зоны дефицита ведется по формуле (36), а на конец – по формуле (37).

4.70. В зоне небольшого подпора водохранилища, где аккумуляция наносов на свале отмели в той или иной степени зависит от действия стокового течения, в первом приближении влияние течения предлагается учитывать следующим образом. При расчетах k_a для нижнего района этой зоны в случае расположения берега в непосредственной близости к основному руслу реки где существует стоковое течение, затрудняющее прибрежную аккумуляцию наносов, в формулы (35) – (37) дополнительно вводится отношение удаленности берега от верхней границы данного района ко всей длине нижнего района. Для среднего и верхнего районов этой зоны при расположении берега вблизи основного русла реки коэффициент k_a принимается равным нулю.

4.71. Как в условиях глубокого, так и неглубокого подпора водохранилища при наличии данных наблюдений за предшествующий период на интересующем или аналогичном ему участке расчетную величину k_a следует уточнять по фактической.

Наиболее важно это делать при сложении берега породами, состоящими из частиц диаметром менее 0,05 мм, так как расчетная величина коэффициента k_a получается здесь во всех случаях равной нулю. В действительности нередко, особенно в начальный период после заполнения водохранилища, при небольшой ширине прибрежной отмели, аккумуля-

ция наносов на краю отмели все же отмечается. Неучет этого обстоятельства способствует завышению прогнозных величин размыва берегов. В настоящее время уточнение расчетов в этом отношении возможно лишь путем использования эмпирических данных. Чем шире здесь будет прибрежная отмель, тем при прочих равных условиях большему измельчению должен подвергаться материал берегообрушений и тем меньшая его доля должна откладываться на внешнем краю отмели. Отсюда следует, что при долгосрочном прогнозе размыва берегов, сложенных тонкозернистым материалом, в большинстве случаев, тем более при формировании широкой прибрежной отмели, можно принимать коэффициент аккумуляции равным нулю.

4.72. Следует также иметь в виду, что в изложенных выше расчетах коэффициента аккумуляции не учитывается различие в плотности размываемой породы и наносов, накапливаемых на свале отмели, что приводит к некоторому завышению значения коэффициента у берегов, сложенных песчаными породами. В связи с этим, судя по данным натурных наблюдений, при прогнозе для берегов, сложенных тонкомелкозернистыми песками, расчетную величину коэффициента аккумуляции можно уменьшить на 7%.

В условиях эксплуатируемых водохранилищ целесообразно специальное изучение плотности размываемых пород ρ и плотности наносов в отмели ρ_a для определения поправки к расчетному значению коэффициента аккумуляции, которая представляет собой отношение этих плотностей в сухом состоянии ρ / ρ_a.

Пример прогноза размыва берега

4.73. Берег, для которого выполнен прогноз, находится в приплотинной глубоководной части водохранилища, эксплуатируемого в течение 26 лет. Берег представляет собой уступ речной террасы высотой 9 м над НПУ, сложенный песками. Береговая линия в плане близка к прямолинейной. Берег открыт для воздействия волн с северо-запада, запада, юго-запада и юга.

Прогноз произведен на последующие 10 лет.

В результате изысканий был получен современный профиль и выяснено геолого-литологическое строение берегового склона по заданному поперечному створу (рис. 9). Гранулометрический анализ слагающих берег песков показал, что в их составе доля частиц крупнее 0,5 мм μ_b = = 0,01, а мельче 0,05 мм μ_s = 0,06. В целом пески относятся к тонкомелкозернистым и, следовательно, коэффициент размываемости по табл. 4, должен быть принят k_b = 1,0. Удельный вес песков с учетом взвешивающего влияния воды γ, вычисленный по формуле (17) на основании непосредственных определений удельного веса частиц породы и сухой породы, оказался равен 9987 Н/м^3.

Для оценки уровенного режима водохранилища были использованы данные наблюдений за уровнем воды в безледное время (при отсутствии на водоеме каких-либо ледовых явлений) по ближайшему водомерному посту за все годы нормальной эксплуатации водохранилища, взятые из

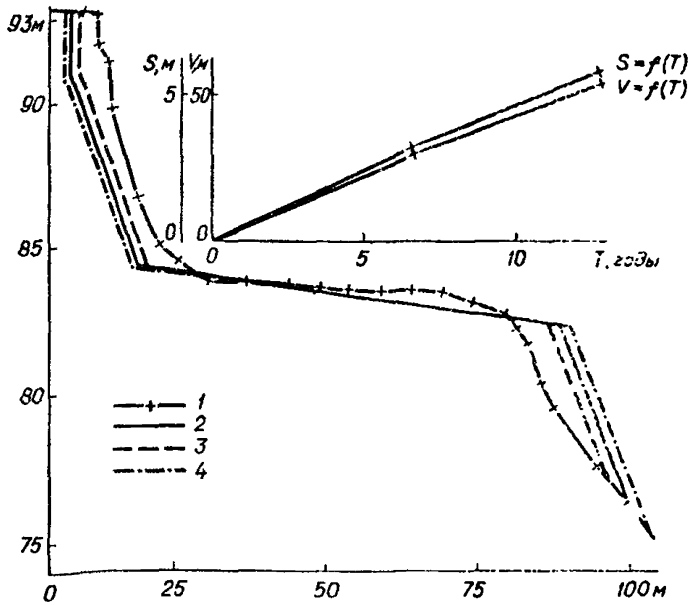


Рис. 9. Фактический и прогнозные профили берегового склона, вспомогательные графики $S=f(T)$ и $V=f(T)$
1 – фактический профиль; 2, 3, 4 – прогнозные профили на сроки соответственно 10 лет, 6,6 и 12,9 года

гидрологических ежегодников. В результате обработки этих данных по интервалам через 0,4 м была составлена таблица повторяемости и обеспеченности средних суточных уровней воды. Согласно этой таблице, многолетний размах колебания уровня воды в безледное время составляет 1,3 м, причем на долю высоких (менее 25% обеспеченности), средних (обеспеченностью от 25 до 75%) и низких (более 75% обеспеченности) уровней воды приходится соответственно 0,43; 0,18 и 0,70 м. Отсюда следует, что водохранилище по уровенному режиму в данном районе можно относить к I типу (см. табл. 5).

При уровенном режиме I типа для расчета верхнего предела размыва необходимо использовать отметку уровня воды обеспеченностью 12,5% (см. табл. 6), а для расчета нижнего предела размыва в условиях формирования устойчивой прибрежной отмели (поскольку водохранилище существует длительное время) – отметку уровня воды обеспеченностью 99% (см. табл. 7). Эти отметки в данном случае оказались равны соответственно 84,16 и 83,51 м. Общая схема построения прогнозного профиля берегового склона при уровенном режиме I типа представлена в табл. 8.

Для оценки ветрового режима были взяты из "Материалов наблюдений на озерах и водохранилищах" и из "Государственного водного ка-

дастра" сведения по ближайшей метеостанции о повторяемости (в процентах) различной скорости ветра по 16-ти направлениям за безледное время за 11 последних лет. На основании этих сведений была составлена таблица многолетней повторяемости (в сутках) различной скорости ветра по восьми основным направлениям за безледный сезон, средняя продолжительность которого составляет 206 сут.

По данным этой таблицы, были выполнены расчеты всех волновых и волноэнергетических показателей, необходимых для прогноза. Ввиду того, что по уровенному режиму район водохранилища относится к I типу, эти расчеты производились без учета влияния колебаний уровня воды при постоянной его отметке, соответствующей уровню обеспеченностью 50% и равной 83,99 м.

Результаты расчетов показали, что нормальная составляющая средней многолетней удельной энергии волн, подходящих к прибрежной отмели, $N_d' = 2272 \cdot 10^6$ кДж/год, а средняя высота волн $h_m = 0{,}33$ м. Учитывая положение берега в середине длинного участка, прямолинейную конфигурацию береговой линии и длительный период эксплуатации водохранилища, рассматриваемый берег был отнесен к зоне транзита вдольбереговых наносов и поэтому показатель k_d был вычислен по формуле (30) и составил 0,852.

С учетом полученного значения k_d и гранулометрического состава песков ($\mu_b = 0{,}01$ и $\mu_s = 0{,}06$) по формуле (37) был произведен расчет коэффициента аккумуляции k_a с уменьшением полученного значения k_a на 7% в связи с предполагаемым различием в плотности песков в коренном залегании и плотности наносов, откладываемых на свале прибрежной отмели (см. п. 4.72), а именно: $k_a = 0{,}852 \cdot 0{,}93 \cdot 0{,}93 = 0{,}74$.

Далее, по аналогии с существующим береговым склоном и учитывая рекомендуемые в табл. 14 показатели формы берега, был построен первый вспомогательный профиль надводной части берегового склона при произвольно заданном отступании бровки берега S_1 на 3,1 м (см. рис. 9, *а*). При этом отметка основания берега (верхнего предела размыва) была принята равной 84,16 м, что соответствует отметке уровня воды обеспеченностью 12,5%. В данном случае высота наката воды в расчете не принималась, так как даже при современном положении прибрежной отмели, когда $\operatorname{tg} \alpha = 0{,}027$, высота наката составляет: $h_m = 5 \cdot 0{,}775 \cdot 0{,}33 \cdot 0{,}027 = 0{,}03$ м.

Объем размытой породы V_1, соответствующий положению данного вспомогательного профиля берега относительно положения профиля существующего берега, составил 28,5 м^3 и, следовательно, $V_{a_1} = 28{,}5 \times 0{,}74 = 21{,}1$ м^3.

Глубина на бровке свала прибрежной отмели d_m, рассчитанная по формуле (14), составляет 1,48 м, следовательно, нижний предел размыва (НПР) находится на отметке: 83,51 – 1,48 = 82,03 м, где отметка уровня воды обеспеченностью 99%.

Учитывая значение объема аккумуляции V_{a_1} и отметку НПР и принимая крутизну свала прогнозируемой отмели, равной максимальной крутизне его у существующей отмели, был вычерчен первый вспомогательный профиль берегового склона в его подводной части (см. рис. 9, *а*).

С этого профиля была снята ширина отмели $l_{m_n} = 66$ м. Поскольку ширина существующей отмели (на начало прогноза) равна 55,5 м, то средняя ширина отмели за время формирования первого вспомогательного профиля берегового склона составляет $l_{m_1} = 0{,}5\ (66 + 55{,}5) = 60{,}8$ м.

Теперь имеются все исходные значения для определения времени формирования первого вспомогательного профиля берегового склона по формуле (15). Оно составило

$$T_1 = 28{,}5 \cdot 9987 \cdot 0{,}852 \cdot 60{,}8 \cdot 60{,}8 / (2\,272\,000\,000 \cdot 0{,}06) = 6{,}6 \text{ года.}$$

Поскольку время формирования первого вспомогательного профиля оказалось меньше срока прогноза, равного 10 годам, то положение бровки берега для второго вспомогательного профиля берегового склона было задано еще дальше от современного ее положения. Построение второго вспомогательного профиля произведено так же, как и первого. При этом для него были получены следующие показатели: $S_2 = 5{,}6$ м, $V_2 = 51{,}3$ м^3, $V_{a_2} = 38$ м^3, $l_{m_n} = 71{,}5$ м, $l_{m_2} = 63{,}5$ м и $T_2 = 12{,}9$ года.

Время формирования второго вспомогательного профиля оказалось несколько больше срока прогноза, поэтому построение третьего вспомогательного профиля не потребовалось.

На основании показателей размыва берега, полученных для первого и второго вспомогательных профилей, были построены графики зависимости $S = f(T)$ и $V = f(T)$ (рис. 9, *б*), с которых были сняты значения S_n и V_n за 10 лет. Они составили соответственно 4,5 м и 41 м^3. Далее был рассчитан объем аккумуляции $V_{a_n} = 41 \cdot 0{,}74 = 30{,}3$ м^3. По тем же правилам, что и для вспомогательных профилей, был построен искомый прогнозный профиль берегового склона. С этого профиля был снят последний из прогнозируемых показателей – ширина прибрежной отмели, которая сформируется через 10 лет. Она составила 69,5 м.

5. СОСТАВ И ОСОБЕННОСТИ ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ, НЕОБХОДИМЫХ ПРИ ПРОГНОЗЕ РАЗМЫВА БЕРЕГОВ

5.1. Для выполнения прогноза ВВРБ *водохранилища,* согласно рекомендациям, изложенным в разд. 4, необходимо иметь следующие исходные материалы:

топографическую карту водохранилища в районе рассматриваемого берега;

поперечные геолого-литологические разрезы берегового склона;

сведения о средних суточных уровнях воды за характерные по водности годы и за многолетие в безледное время или проектные данные об уровенном режиме водохранилища (см. п. 4.14);

срочные данные о скорости и направлении ветра за отдельные годы и за многолетие в безледное время (см. п. 4.26);

сведения о стоковом течении в характерные периоды водного режима водохранилища;

сведения о продолжительности безледного сезона за многолетие и за те же годы, за которые взяты материалы об уровнях воды и о ветре;

данные о гранулометрическом составе, удельном весе и плотности частиц пород и сухих пород, слагающих берег, и те же характеристики для прибрежных отложений;

показатели свойств пород размываемого берега – сопротивляемость сдвигу, сила сцепления, угол внутреннего трения, влажность, содержание легкорастворимых солей и органических веществ;

сведения о современной динамике береговой зоны по поперечному профилю и в плане.

5.2. Состав и объем изысканий для получения указанных материалов зависят от состояния изученности и сложности условий интересующего участка побережья и района водохранилища; от срока (до 10 лет или более), требуемой детальности и надежности прогноза, которая определяется классом, назначением сооружения и стадией его проектирования; от типа водохранилища (существующее или проектируемое).

5.3. Изыскания в условиях *проектируемого водохранилища* должны быть прежде всего направлены на освещение рельефа побережья и дна будущего водохранилища. Непосредственно на интересующем участке с этой целью следует выполнять площадную съемку в масштабе не мельче 1:2000 и измерения отдельных поперечных профилей. Протяженность участка детальных топографических измерений зависит от поставленных задач, но не должна быть менее 1 км. Для получения поперечных профилей береговых склонов следует применять тахеометрическую съемку, сочетая ее на крутых склонах с ватерпасовкой. Необходимо выделять основные элементы этих профилей и отмечать современные проявления деформаций. Поперечные профили следует измерять в характерных местах побережья на расстоянии не более 250 м один от другого.

Указанный объем топографических измерений достаточен лишь при наличии топографической карты района водохранилища в масштабе 1:25 000 – 1:50 000. В противном случае необходимость ее составления резко увеличивает объем топографических работ.

5.4. Вторая задача при производстве изысканий на проектируемом водохранилище заключается в выяснении геолого-литологического строения будущего побережья и изучении некоторых свойств слагающих его пород. При этом должны быть установлены основные литологические разности, последовательность их залегания и толщина слоев, степень их увлажненности (обводненности), изучен гранулометрический состав (с обязательным выделением фракций более 0,5 мм и менее 0,05 мм), определены удельный вес и плотность частиц и сухой породы, угол естественного откоса под и над водой (для несвязных пород), содержание в породе легкорастворимых солей и органических веществ. В случае необходимости в установлении предельного угла устойчивого надводного откоса требуется определить для береговых пород показатель сопротивления сдвигу, силу сцепления, угол внутреннего трения и плотность. Количество таких определений должно быть достаточным для получения средних показателей в пределах важнейших литологических разностей.

Можно рекомендовать также проведение специальных полевых опытов

по изучению размываемости пород с помощью струи воды постоянного напора, создаваемой, например, мотопомпой. При всей условности таких опытов они все же дают результаты, которые вполне применимы для относительной (сравнительной) оценки несвязных и связных пород по их способности к размыву. Это позволяет использовать данный способ для определения значений коэффициента размываемости $K_в$. Оценка размываемости пород в этом случае производится непосредственно на месте их залегания и к тому же в короткий срок, что является большим преимуществом указанного способа. Учитывая, что данный способ еще не применялся при изысканиях, в п. 5.11 дается его более подробное изложение.

В связи с необходимостью изучения пород в границах всей возможной зоны размыва побережья в некоторых случаях требуется бурение до отметки нижнего предела размыва. Плотность пород тогда измеряется методом динамического зондирования.

5.5. Все характеристики гидрометеорологического режима проектируемого водохранилища, необходимые для прогноза ВВРБ, следует получать расчетным путем, используя материалы наблюдений, имеющиеся в системе Госкомгидромета.

5.6. Для прогноза ВВРБ на *существующем водохранилище* при обосновании проектов наиболее ответственных сооружений одной из главных задач полевых изысканий становится получение или уточнение данных о гидрометеорологическом режиме водохранилища. При этом прежде всего следует оценить репрезентативность ближайших пунктов наблюдений, осуществляемых Госкомгидрометом. Для этого необходима организация кратковременных аналогичных наблюдений непосредственно в интересующем районе. В состав гидрометеорологических изысканий могут входить водомерные и ветроволномерные наблюдения, измерения стокового течения.

Организация временного ветроволномерного поста особенно необходима при удаленности опорной метеостанции. Наблюдения должны дать материалы для проверки и уточнения расчетных элементов ветровых волн в системе при различных скоростях и направлениях ветра и различных уровнях воды в водоеме.

В верховьях водохранилищ, тем более при нахождении их в каскаде, бывает целесообразна организация также временного водомерного поста. Это обусловлено повышенной изменчивостью уровня воды по длине водоема и во времени при редкой сети водомерных постов Госкомгидромета или недостаточной частоте наблюдений на них.

В районах возможного действия стокового течения необходимо проведение нескольких серий измерений направления и скорости течения при различных режимах работы гидроузлов и при характерных уровнях воды в водоеме. Такими измерениями должна быть охвачена прибрежная акватория вдоль всего изучаемого побережья. Полученные результаты используются для уточнения расчетных значений коэффициента аккумуляции наносов на свале прибрежной отмели и позволяют более правильно подойти к построению прогнозного профиля подводной части берегового склона.

Следует уделить внимание сбору сведений о воздействии на берега

льда при его подвижках. В связи с этим весьма полезно проведение обследований изучаемого участка перед вскрытием водоема от ледяного покрова.

5.7. В состав геологических работ помимо того, что указано для условий проектируемого водохранилища, должно входить изучение геолого-литологического строения прибрежной отмели, гранулометрического состава, удельного веса и плотности частиц и сухих отложений в различных аккумулятивных береговых формах, прежде всего в аккумулятивной части прибрежной отмели и на пляже.

Изучение строения прибрежной отмели производится путем закладки траншеи или зондированием. Наиболее благоприятен для этого период предполоводной сработки воды из водохранилища, перед самым окончанием ледостава, когда отмель осушается и освобождается ото льда. По строению прибрежной отмели можно восстановить первоначальное положение береговой линии, определить ширину абразионной части отмели, а следовательно, и общие размеры отступания берега, приближенно оценить объем размыва берега с момента заполнения водохранилища. Одновременно с выяснением строения отмели выполняется отбор проб наносов с последующим определением указанных в предыдущем абзаце характеристик.

5.8. При топографических работах должны быть установлены прежде всего особенности рельефа деформируемой береговой зоны.

Детальность измерений поперечных профилей береговых склонов как в надводной, так и в подводной частях должна быть достаточной для определения основных их показателей: отметки бровки склона, бровки и основания берегового обрыва, бровки свала прибрежной отмели; крутизны и высоты отдельных элементов надводных откосов; размеров и формы пляжа, подводных валов и ложбин, основной поверхности отмели и ее свала. Последующий анализ полученных профилей позволяет проверить или даже уточнить некоторые показатели, используемые при прогнозе: начальную ширину прибрежной отмели, глубину на бровке свала отмели, отметку верхнего предела размыва, крутизну и форму берегового обрыва, а также прибрежной отмели. При топографических работах особое внимание следует обращать на изучение плановых очертаний побережья, в частности аккумулятивных береговых форм.

Большую ценность представляет выполнение хотя бы кратковременных наблюдений за динамикой берега и прибрежной отмели путем повторных измерений поперечных профилей береговых склонов или использование материалов прежних разновременных съемок рельефа в условиях существующего водохранилища. Показатели динамики берега, полученные в результате обработки данных современных и прежних измерений, используются для уточнения коэффициента размываемости пород и коэффициента аккумуляции материала в прибрежной зоне. Решению этих же задач служит восстановление первоначального профиля берегового склона на основе материалов топографических съемок до создания водохранилища и изучения строения существующей прибрежной отмели, а затем сравнение первоначального профиля берегового склона с современным.

Наличие фактических данных о размыве берегов позволяет также провести проверочные прогнозные расчеты ВВРБ.

В дополнение к тому, что сказано о самой методике выполнения топографических работ в условиях проектируемого водохранилища (см. п. 5.3), следует еще упомянуть о требованиях к промерам глубин. Промеры, проводимые по поперечным к линии берега створам, должны быть наиболее детальными на прибрежной отмели и ее свале. Расстояния по створу в прибрежной зоне лучше измерять по размеченному тросу с интервалом между промерными точками не более 5 м, а в зоне свала – через 1 м. Особых указаний к промерам глубин в открытой части водоема не имеется.

5.9. Для выполнения прогноза размыва берега под действием стокового течения на *свободных реках* и в условиях *нижних бьефов гидроузлов* согласно рекомендациям разд. 3 необходимы следующие материалы: карта русла реки в районе рассматриваемого берега; поперечные профили всего русла; средние многолетние или фактические за конкретные годы гидрологические показатели, а именно: отметки уровня воды в реке при вскрытии ледяного покрова, в начале, на пике и в конце половодья, а также отметки многолетних (среднего и максимального) уровней; продолжительность периода от момента вскрытия ледяного покрова до пика и до окончания половодья или продолжительность всего половодья и периода его подъема.

5.10. Требования к изысканиям в основном те же, что и на водохранилищах. Отличия заключаются в следующем.

На протяжении участка, включающего, как минимум, две-три смежных излучины русла выше и ниже места, для которого необходим прогноз, следует выполнять рекогносцировочное обследование. В процессе обследования производится картирование основных морфологических элементов русла. Картирование необходимо осуществлять по заранее подготовленной картографической или аэрофотосъемочной основе возможно более крупного масштаба или наиболее поздней съемки. В состав обследования могут включаться также промеры глубин для установления основных русловых форм и их подвижности. Такое обследование позволяет выявить общие характеристики как самого руслового процесса, так и условий, определяющих его развитие.

Непосредственно на участке прогноза русловых деформаций следует производить детальную топографическую съемку берегов и русла. Она необходима во всех случаях независимо от наличия материалов прошлых лет. Масштаб съемки зависит от протяженности участка и ширины русла.

При промерах глубин в основной части русла используется эхолот с определением его местонахождения методом засечек. В условиях существующих нижних бьефов гидроузлов промеры глубин следует приурочивать к выходным дням, когда сток воды через верхний гидроузел бывает наименьшим, что вызывает ослабление или полное прекращение стокового течения и повышает устойчивость уровня воды. В таких условиях облегчается выполнение промеров глубин и повышается их точность. Планирование зимних промеров в верхних районах нижних бьефов нецелесообразно из-за неустойчивости ледового покрова.

Стационарные наблюдения над размывом берегов и русла по отдельным поперечникам береговой линии створам требуются лишь при обосновании проектов ответственных сооружений в особо сложных случаях, когда рекогносцировочное обследование и топографические съемки разных лет не освещают с достаточной полнотой режим русловых деформаций.

Сроки производства всех упомянутых полевых изысканий выбираются с таким расчетом, чтобы была возможность оценить динамику берегов и русла в периоды наиболее активных ее проявлений: после зимней сработки воды из вышележащего водохранилища, после максимальных сбросов воды через верхний гидроузел, до и после половодья и т.д.

Гидрометеорологические изыскания, как правило, не выполняются. Для проектирования ответственных сооружений может возникнуть необходимость в проведении кратковременных водомерных наблюдений с целью корректировки данных по ближайшим водомерным постам Госкомгидромета.

5.11. Для оценки размываемости пород в массиве в качестве опытной установки рекомендуется использовать мотопомпу и пожарный шланг с брандспойтом, имеющим на выходе внутренний диаметр 16 мм. Испытание породы на размыв струей воды необходимо производить с расстояния 1,5–2 м при давлении воды, поступающей в шланг, 2–2,5 тыс. кПа. Продолжительность одного опыта не должна превышать: для песков – 5–10 с, для супесей и легких суглинков – 10–20 с, для тяжелых суглинков и глин – 30–60 с.

В результате опыта в породе обычно образуется ниша в виде усеченного конуса, объем которой легко определяется геометрическим способом. Если ниша размыва имеет неправильную форму и небольшой объем, измерение последнего следует производить путем заполнения ниши инородным материалом.

Энергия струи на выходе из брандспойта E, Дж, вычисляется по формуле

$$E = \gamma \mu \omega t \sqrt{2 g^3 H^3}, \qquad (38)$$

где $\gamma = 9810$ Н/м^3 – удельный вес воды; μ – коэффициент расхода воды, равный для конических сходящихся насадок 0,95; ω – площадь поперечного сечения насадки, м^2; $g = 9{,}81$ м/с^2 – ускорение силы тяжести; H – высота, соответствующая напору жидкости, м; t – продолжительность размыва, с.

Размываемость породы ϵ, м^3/Дж, рассчитывается по формуле

$$\epsilon = V / E, \qquad (39)$$

где E – энергия, затраченная на размыв породы, Дж; V – объем размытой породы, м^3.

Количество опытов для получения надежных средних значений размываемости породы, подвергаемой испытанию, зависит от степени ее одно-

родности, а также качества проведения опытов, особенно от точности измерения объема ниш размыва. Для однородных пород достаточно проведения трех-пяти опытов.

Значения коэффициентов размываемости для некоторых пород, полученные в результате выполнения таких опытов, и способ их расчета приведены в прил. 2.

Исходные данные для построения вспомогательных графиков

$$\bar{n} = f\ (V_w) \quad \text{и} \quad n_g = f\ (\bar{h})$$

V_w, м/с	L = 0,5 км		L = 1 км		L = 3 км		L = 5 км		L = 7 км		L = 10 км		L = 15 км		L = 20 км	
	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж
3	0,03	304	0,04	520	0,07	2050	0,08	2972	0,08	3159	0,09	4277	0,10	5758	0,10	6043
4	–	–	0,06	853	–	–	–	–	–	–	–	–	0,16	15 549	0,17	18 328
5	0,06	814	0,08	2688	0,13	8015	0,15	11527	0,17	16 324	0,19	21013	0,22	31 667	0,24	40 604
6	–	–	0,10	4071	–	–	–	–	–	–	–	–	0,28	55 162	0,31	76 927
7	0,09	3061	0,12	6210	0,19	18 148	0,23	31 353	0,26	43 743	0,30	62823	0,34	89 399	0,38	11 7573
8	–	–	0,14	8240	–	–	0,27	44 439	–	–	–	–	0,40	129884	0,44	174099
9	0,12	5611	0,16	11272	0,26	36 866	0,31	62186	0,36	91419	0,40	128354	0,48	196946	0,52	256316
10	–	–	0,18	14813	–	–	0,36	86760	–	–	–	–	0,54	268676	0,61	386338
11	0,15	8594	0,20	18266	0,32	61865	0,40	113737	0,46	161953	0,52	230005	–	–	0,69	520629
12	–	–	0,22	22946	–	–	–	–	–	–	–	–	0,68	459667	0,76	642541
13	0,18	13606	0,24	29096	0,39	100 435	0,48	174343	0,56	257 463	0,64	375507	–	–	0,84	825450
14	–	–	0,26	34 345	–	–	–	–	–	–	–	–	0,82	724478	0,94	988868
15	0,21	19 591	0,28	41055	0,46	146610	0,56	251509	0,66	391880	0,76	570393	–	–	1,01	1184597
16	–	–	0,30	48481	–	–	–	–	–	–	–	–	0,96	1046658	1,10	1394119
17	0,24	26732	0,32	56721	0,53	204028	0,65	366129	0,76	555835	0,88	819037	–	–	1,18	1714160

Продолжение прил. 1

V_W, м/с	L = 0,5 км		L = 1 км		L = 3 км		L = 5 км		L = 7 км		L = 10 км		L = 15 км		L = 20 км	
	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж	$\bar{h}$, м	n_g, кДж
18	–	–	0,34	65796	–	–	–	–	–	–	–	–	1,10	1437498	1,26	2022214
19	0,27	33864	0,36	75086	0,60	270050	–	–	0,86	717562	1,00	1115005	–	–	1,36	2271025
20	–	–	0,38	84935	–	–	0,78	555079	–	–	–	–	1,24	1942154	1,43	2534070
21	0,30	43831	–	–	0,67	371897	–	–	0,96	941780	1,12	1424275	–	–	1,5?	2963209
22	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,58	3354167
23	–	–	0,44	120114	0,74	468182	–	–	–	–	–	–	–	–	1,67	3731675
25	0,34	59616	–	–	–	–	1,02	1048306	1,17	1516302	–	–	–	–	–	–
26	–	–	0,50	160835	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
29	–	–	0,56	214064	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Результаты опытного определения коэффициента размываемости пород, слагающих берега Волги и Камы

Наименование породы и ее возраст	Содержание частиц, %, при размере частиц					Удельный вес, Н/м			Размываемость ϵ, $м^3/Дж$	Коэффициент размываемости $k = \epsilon\gamma / (\epsilon_0 \gamma_0)$
	>0,5	0,5–0,25	0,25–0,10	0,10–0,05	<0,05	частиц породы γ_b	сухой породы γ_v	пород с учетом взвешивающего влияния воды γ		
Песок мелкий (a Q_{IV})	–	0,4	92,3	7,3	–	25 996	14264	γ_0 = =8878	ϵ_0 = 0,00223	1,0
Песок средний (f Q_{II} d)	24,9	54,1	10,2	10,8	–	25996	–	–	0,00161	0,72
Супесь (a Q_{IV})	–	0,3	50,5	39,8	9,4	26193	–	–	0,00067	0,30
То же	–	0,4	55,6	33,4	10,6	26193	14 617	9143	0,00054	0,25
	–	0,1	1,0	48,7	50,2	26683	14666	9270	0,00029	0,14
,,	–	0,4	35,5	33,0	31,1	26781	15461	9800	0,00026	0,13
,,	–	0,2	1,1	17,1	81,5	26781	13705	8682	0,00022	0,10
,,	–	0,9	12,2	28,3	58,6	26683	13557	8574	0,00022	0,10
Суглинок (g Q_{II} d)	6,2	9,4	15,4	18,3	50,7	26 683	18 345	11595	0,00009	0,053

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3
1. Основные закономерности динамики береговой зоны 5
Общие понятия 5
Особенности динамики береговой зоны рек 6
Особенности динамики береговой зоны водохранилищ 7
2. Требования к прогнозу размыва берегов при решении практических задач 12
3. Рекомендации по оценке и прогнозу береговых деформаций на свободных реках 14
Общие положения 14
Расчеты береговых деформаций 15
Примеры расчетов 18
4. Рекомендации по прогнозу размыва берегов водохранилищ 20
Этапы прогноза 20
Учет влияния уровенного режима водохранилища на размыв берегов 25
Расчет волновых и волноэнергетических характеристик 34
Учет изменчивости волноэнергетических характеристик при краткосрочном прогнозе 44
Предложения по прогнозу в период начального заполнения водохранилища 49
Построение прогнозного профиля берега 49
Расчет высоты наката волн 52
Расчет коэффициента аккумуляции 53
Пример прогноза размыва берега 55
5. Состав и особенности изысканий для получения исходных данных, необходимых при прогнозе размыва берегов 58
Приложение 1. Исходные данные для построения вспомогательных графиков $\bar{n} = f(V_W)$ и $n_g = f(\bar{h})$ 65
Приложение 2. Результаты опытного определения коэффициента размываемости пород, слагающих берега Волги и Камы 67

gost.e-ecolog.ru