

УДК 627.7(03); 551.4

Труды Академии водохозяйственных наук. Вып. 4. Водные пути и русловые процессы. - М., 1996.

В сборнике представлены статьи членов Академии водохозяйственных наук, посвященные вопросам исследований русловых процессов на судоходных реках и строительству водных путей. Рассматриваются природоведческие и инженерные аспекты проблемы, дается оценка экологической ситуации, возникающей при использовании рек в качестве водотранспортных магистралей, влияния различных видов хозяйственной деятельности на русловые процессы и состояние водных путей и другие вопросы. Предназначен для специалистов в области гидротехники, гидрологии, водных путей.

Редакционная коллегия: И.С. Румянцев (*председатель*), А.З. Брунин (*зам. председателя*), Ю.П. Правдивец, Р.С. Чалов, М.С. Грушевский (*редактор выпуска*), М.Ю. Белоцерковский (*ответственный за выпуск*).

© Академия водохозяйственных наук, 1996 г.

Разгуляев А.Б. Внутренние водные пути России: современное состояние и проблемы развития.....	4
Правдивец Ю.П., Левачев С.Н., Беляков А.А. Об экономических предпосылках создания транспортно-энергетической водной сети (ТЭВС) Российской Федерации.....	12
Беляков А.А. Классическое право и законы Российской империи в связи с правовыми проблемами регулирования, охраны и использования водных ресурсов Российской Федерации.....	22
Правдивец Ю.П., Беляков А.А. Принципы проектирования объектов транспортно-энергетической водной сети (ТЭВС) РФ в связи с русловыми процессами рек.....	36
Антроповский В.И. Методика гидролого-морфологической оценки переформирований русел зарегулированных рек.....	44
Грачев Н.Р. Об использовании методов математического моделирования русловых потоков в практике проектирования на водных путях.....	52
Беркович К.М., Зайцев А.А., Паши А.В., Чалов Р.С. Проблемы учета русловых процессов при организации и проведении путевых работ на равнинных реках с галечно-валунным руслом.....	56
Кумсаишвили Г.П., Христофоров А.В. Энергетическое использование р.Вилоя и проблемы судоходства.....	68
Беркович К.М., Турыкин Л.А. Влияние русловых карьеров на режим перекатов равнинных рек.....	84
Алексеевский Н.И., Зайцев А.А., Чалов Р.С. Баланс наносов, деформации и возможности регулирования разветвленного русла крупнейшей реки (на примере р. Лены в районе г. Якутска).....	90
Барышников Н.Б., Самусева Е.А., Пирожков В.Г. Русловые карьеры и их влияние на условия судоходства (на примере р.Томи).....	108
Гладков Г.Л., Тауэжянский К.С. Моделирование русловых переформирований в нижнем бьефе плотины Бад-Аббах на р.Дунай.....	116
Дегтярев В.В. Дноуглубительные работы для обеспечения судоходства на внутренних водных путях при современном законодательстве России.....	127
Михайлов В.Н., Коротаев В.Н. Устьевые бары непривливых устьев рек: морфологические типы и способы регулирования.....	132
Бутаков А.Н. Математическое моделирование режима устьевого бара при обеспечении навигационных глубин.....	151
Левит-Гуревич Л.К. Метод гидравлического расчета в естественном русле с целью выбора противопаводковых мероприятий.....	163
Грушевский М.С. Некоторые вопросы гидравлических расчетов для потоков в открытых руслах.....	174
Натальчук Ю.М. Гидравлическая схематизация половодья.....	192
Самарин В.Ф. Перспективы развития Темрюкского водно-транспортного узла.....	201
Костюков В.Д. Надежность портовых гидротехнических сооружений с учетом морального и физического износа.....	215

Московский государственный университет

ПРОБЛЕМЫ УЧЕТА РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИИ ПУТЕВЫХ РАБОТ НА РАВНИННЫХ РЕКАХ С ГАЛЕЧНО-ВАЛУННЫМИ РУСЛАМИ

Состав руслообразующих наносов определяется источниками их поступления в русло и зависит от рельефа и геологического строения бассейна. Значительная обнаженность скальных и крупнообломочных пород в сочетании с большой крутизной и высотой склонов создают условия для формирования галечных и галечно-валунных русел, в которых песчаные и более мелкие фракции наносов перемещаются транзитом (во взвешенном состоянии) и участвуют в руслоформировании только в качестве заполнителя крупнообломочного аллювия.

Геолого-геоморфологические условия территории России благоприятствуют широкому распространению подобных русел, причем не только на горных реках, но и на реках равнинного типа. В Европейской части России участки рек с галечным и галечно-валунным составом аллювия встречаются лишь местами, при пересечении реками моренных возвышенностей, на Среднерусской возвышенности, в Предуралье, но к востоку от Енисея это - преобладающий тип русла по составу донных грунтов [18]. Здесь галечно-валунные русла характерны для многих крупных рек, являющихся важнейшими водно-транспортными магистралями - Енисея (до впадения Нижней Тунгуски), верхней и средней Лены (почти до Якутска), Алдана, Олекмы, Чары, Витима, Киренги, Яны (на Куларском участке), Индигирки (до устья Бодярихи), Колымы (до Среднеколымска), среднего и верхнего Амура и др. В большинство русел восточноевропейских рек галечно-валунный материал поступает из подстилающих дно и слагающих берега рек коренных отложений, образованных рыхлообломочной смесью из песка, гравия, гальки и валунов. На сибирских реках источником галечно-валунных наносов служит крупнообломочный материал, поступающий со склонов (курумы, осыпи, обвалы) и из притоков, являющихся типичными горными реками. Обломки склонового происхождения окатываются и превращаются в гальку и валуны уже в процессе их транспортирования потоком.

Поддержание и улучшение водных путей на галечно-валунных реках достигается обычно регулированием их русел посредством дноуглубительных работ, возведения выправительных и берегоукрепительных сооружений, т.е. общепринятыми в практике путевых работ методами. Однако их применение далеко не всегда приводит к ожидаемому эффекту, т.к. они выполняются без учета

специфики русловых процессов, связанной с особенностями эрозии, транспорта и аккумуляции галечно-валунных наносов.

Проектирование мероприятий по улучшению условий судоходства должно базироваться на методологическом фундаменте, заложенном Н.И.Макаевым [15]. Согласно ему, любое вмешательство в русловую режим будет оптимальным по соотношению результатов и затрат, а также сохранению природной среды, если оно соответствует естественному ходу русловых деформаций. Иными словами, мероприятия по регулированию русла должны не противоречить, а поддерживать и направлять в нужном для получения положительного эффекта направлении естественные процессы переформирования речных русел. Поэтому при разработке методов регулирования первоочередной задачей является выяснение механизмов, направленности и темпов русловых деформаций на каждом участке реки. Необходима также типизация русловых деформаций, которая позволила бы понимать и прогнозировать поведение системы поток-русло.

Впервые состав донных наносов как классификационный признак русла был введен Н.И.Макаевым [15]. Характер русловых деформаций положен в основу морфодинамической классификации речных русел Р.С.Чалова, в наиболее полном виде представленной в монографии [16]. Она позволяет решать обратную задачу - по морфологическому облику русла, то есть по информации, достаточно доступной, определять характер русловых деформаций, с тем, чтобы соответствующим образом ориентировать применение тех или иных методов регулирования. Однако в этой редакции классификации характер донных грунтов как признак отсутствует. Тем не менее, при проведении конкретных исследований применение морфодинамической классификации осуществлялось с учетом специфики развития русел разных типов в зависимости от состава руслообразующих наносов [1-4]. В последнем варианте морфодинамической классификации [19] выделен специальный блок - типы русел по составу руслообразующих наносов.

Исторически сложилось так, что богатые отечественные традиции в области регулирования русел в целях улучшения условий судоходства, начиная с работ В.М.Лохтина, Н.С.Лелявского, В.Е.Тимонова, Н.Н.Пузыревского, сформировались преимущественно на реках с песчаным аллювием. То же самое происходило и за рубежом, если не считать практически полной канализации русел многих западноевропейских рек, протекающих в горном обрамлении. Поэтому даже апробированные приемы регулирования нуждаются в определенной корректировке при перенесении их на русла с крупнообломочным составом руслообразующих наносов. Существенную роль при этом играют такие факторы, как особенности транспорта галечно-валунного аллювия, устойчивость русел, степень насыщенности руслообразующими наносами, геолого-геоморфологическая обстановка руслоформирования и наличие скальных грунтов в русле и по бортам.

При воздействии потока на дно галечно-валунного русла, помимо крупности аллювия, значительный вклад в сопротивляемость размыву вносят такие факторы, как взаимодействие отдельных частиц друг с другом (в частности, их заклинивание, увеличивающее общую устойчивость дна), армирование дна слоем частиц повышенной крупности (аллювиальная отмостка), резко выраженная неоднородность наносов, залегающих под отмосткой (от валунов до песка). Нередко длительное состояние покоя приводит к дополнительному возрастанию прочности грунта за счет уплотнения и коагуляции илисто-глинистыми частицами. Имеет значение уплотняющая роль ледохода, особенно для прибрежных отмелей и осередков, обсыхающих в межень: льдины, подобно дорожным каткам, утрамбовывают их поверхность, создавая "булыжные мостовые" [10]. На равнинных реках скорости течения, достаточные для перемещения галечно-валунного аллювия, достигаются лишь при прохождении максимальных расходов воды, когда разрушается созданная ранее отмостка, и в движение приводится захороненная полифракционная масса аллювия. На спаде волны паводка или половодья после остановки наиболее крупных частиц снова формируется отмостка, и дно остается неподвижным до следующего крупного паводка [13]. В большинстве случаев в начале многоводного сезона расходы галечно-валунных наносов ниже, чем при тех же скоростях течения в последующие фазы гидрологического режима вследствие постепенного разрыхления грунта, вымывания коагулирующего тонкого материала и повышения транспортирующей способности взвешенного потока по отношению к крупнообломочному материалу [12, 17, 20]. Нередко ввиду повышенной крупности руслообразующего аллювия средние скорости потока вообще не достигают размывающих величин, необходимых для начала массового движения донных наносов, и в течение ряда лет сдвиг отдельных валунов и разрушение отмостки не происходит.

Механизм транспорта галечно-валунных наносов изучался на ряде перекатов верхнего Алдана методом маркирования аллювиальной отмостки на надводных (в межень) побочнях и осередках. В годовом цикле (сентябрь 1986 - сентябрь 1987 г.) было обнаружено повсеместное активное перемещение средней и крупной гальки на расстояние до 150-200 м. Частицы валунной фракции перенесены на гораздо меньшие расстояния - до 30 м, и лишь в отдельных случаях - до 200 м, причем на разных участках русла доля пришедшего в движение валунного материала колебалась в широком диапазоне (от 4 до 99%). Донные неразмывающие скорости для несвязных грунтов с диаметром частиц 100 мм, рассчитанные по формуле Ц.Е. Мирцхулавы [14], составляют для требуемого диапазона глубин (5-10 м) 1,7 м/с и достигаются при средней скорости 3,6-4,0 м/с. Максимальные средние скорости течения на данном участке Алдана не превышают 3,0 м/с и в конкретном сезоне достигали 2,9 м/с. Сравнение этих величин с рассчитанными неразмывающими скоростями, а также общий характер смещения маркированных частиц (значительная часть

материала осталась на месте, мощность слоя перемещения - одна частица аллювия) свидетельствует о том, что происходило импульсное перемещение отдельных частиц под действием локальных турбулентных пульсаций в придонной области потока, достигающих 30-40% от средней скорости. В то же время, зафиксирована и полная потеря маркированных обломков на отмели после прохождения паводка или серии паводков. На европейских реках неразмывающие скорости для гальки и валунов существенно выше средних скоростей потока при руслоформирующих расходах и на пике половодья. На Немане, например, при пересечении Гродненской моренной возвышенности они не превышают 1,2 м/с, тогда как сдвиг гальки размером 2 см может происходить при скорости 1,34 м/с, размером - 10 см - 2,33 м/с. Поэтому здесь галечно-валунные наносы не перемещаются, представляя собой остаточные отложения (перлювий, по терминологии В.В. Ламакина), оставшиеся на дне реки после вымывания из коренного грунта песчано-гравийных фракций и формирующие отмостку [7].

Оценка устойчивости галечно-валунных русел на основе показателей, включающих диаметр руслообразующих наносов (число Лохтина - Л, коэффициент стабильности Н.И. Маккавеева - Кс), дает значения в десятки и даже первые сотни единиц, что на один-два порядка величин превышает показатели для песчаных русел. Галечно-валунные русла, таким образом, автоматически попадают в категорию абсолютно устойчивых, более того - жестких, что отражает на самом деле лишь факт замедленности русловых деформаций при крупнообломочном составе аллювия. Малые величины стока влекомых наносов обуславливают стабильность побочней, осередков и гряд меньших размеров (прибрежных кос), движение которых зачастую не фиксируется инструментальными методами и не выявляется при сравнении планов русла за 30-40-летний период из-за разрешающей способности планов, выполненных обычно в масштабе 1:10000. Таковы русла верхнего Алдана, нижнего Витима; здесь о смещении гряд может свидетельствовать отсутствие заполнителя в полосе не более 1-2 м от их гребней, "рыхлость" материала и его подвижность на низовом склоне (подвалье). Относительно более динамичны русло Яны на всем протяжении Куларского участка, верхняя и средняя Лена, средний Алдан, где темпы смещения крупных русловых гряд достигают нескольких метров в год. Наибольшей динамичностью отличаются широкопойменные сложноразветвленные галечно-валунные русла, о чем свидетельствует уже само наличие многочисленных аллювиальных форм и что подтверждается натурными измерениями скоростей их перемещения. Так, на Киренге при числе Лохтина и коэффициенте Н.И. Маккавеева в несколько десятков единиц смещение побочней и осередков в расширениях русла происходит со скоростями до 20-30 м/год, что вплотную приближается к темпам перестроения песчаных русел. О смещении галечно-валунных наносов говорит также известный факт заносимости дноуглубительных прорезей на перекатах, необходимость

регулярного дноуглубления русла верхней Лены, которое по существу превращено в канал стока воды и наносов.

Дискретность перемещения галечно-валунных наносов, чередование кратковременных периодов их транспортировки с длительными периодами покоя, резкость перехода от состояния движения к остановке определяет также особенности и морфологию русла, и дифференциации самих наносов по крупности, и специфику русловых переформирований. Как правило, наиболее крупные наносы движутся во врезанном русле и в сужениях долины, где велик удельный расход воды и, следовательно, поток обладает наибольшей влекущей силой. На неразветвленных участках врезанного русла при подъеме уровней воды и пропорциональном росте скоростей течения осуществляется транзит материала. В этих условиях даже незначительное расширение русла вызывает уменьшение скорости потока и соответствующее снижение интенсивности перемещения галечно-валунного материала, его частичную остановку и образование аккумулятивных осередков и островов. В сравнительно широкой долине с развитой поймой наибольшая концентрация стока также наблюдается в сужениях долины. Относительный рост удельного руслоформирующего расхода в сужениях обуславливает увеличение крупности и транспорта руслообразующих наносов. Резкая остановка наносов после прохождения волны паводка сопровождается образованием осередков, вследствие чего в сужениях широкопойменной долины галечно-валунное русло характеризуется особенно сильной разветвленностью. При этом, поскольку движение самых крупных наносов происходит только в годы с наиболее высокими паводками, а более мелкий материал транспортируется ежегодно, переформирования таких разветвлений очень замедленны, их рельеф длительное время остается неизменным, а сами русла, несмотря на многорукость, отличаются высокой устойчивостью.

В расширениях широкопойменной долины транспорт руслообразующего материала существенно меньше, чем в сужениях. Поэтому русло здесь обычно неразветвленное (или его разветвленность значительно меньше), и лишь там, где оно переваливает от одного борта долины к другому поперек поймы, возникают пойменно-русловые разветвления.

В разветвленном на рукава галечно-валунном русле наиболее интенсивное движение наносов осуществляется в развивающихся рукавах. В результате они отличаются вторичной разветвленностью осередками и небольшими по размеру островами, в то время как отмирающие рукава обычно меандрируют. Такое различие в морфодинамике (разветвление или меандрирование) развивающихся и отмирающих рукавов объясняется подобно различиям руслоформирования в сужениях и расширениях, разными объемами транспортируемого потока при руслоформирующих расходах материала и резкой его остановкой на спаде паводка.

Между развивающимися и сохраняющимися в тыловой части поймы отмирающими рукавами могут возникать большие перекосы

водной поверхности, достигающие десятков сантиметров. Благодаря им, во время высоких половодий иногда происходят прорывы потоков через пойму с образованием соединяющего рукава. Этот процесс носит "катастрофический" характер, но новое русло быстро разрабатывается и дальнейшие переформирования снова замедляются.

Очевидно, что для сопоставления галечно-валунных русел по интенсивности деформаций необходима особая шкала устойчивости. Она может быть построена с учетом формы поперечного сечения русла на основании эмпирической закономерности: с увеличением распластанности (относительной ширины) русла, т.е. с удалением от гидравлически наиболее выгодной параболической формы, растет подвижность русловых образований и падает устойчивость русла. Форма живого сечения в явном виде входит в морфометрический

показатель С.Г.Шатаевой - $A = \frac{\lg \Delta h}{\lg \Delta b}$, представляющий собой отношение логарифмов приращения глубины потока Δh при изменении его ширины Δb . Для верхнего Алдана с высокой степенью корреляции были получены связи K_c , L и A для разных морфодинамических типов русла. Построенная на основе этих связей и натуральных наблюдений за динамикой русла шкала устойчивости (таблица) может в первом приближении применяться и для других рек с галечно-валунным составом аллювия.

Таблица
Классификация типов галечно-валунных русел по степени их устойчивости

Характеристика устойчивости	Показатели устойчивости			
	А	Kc		
		Излучины	Прямолинейные участки	Разветвления
Неустойчивые	< 1,4	<610	-	<310
Слабоустойчивые	1,4-1,7	610-780	< 110	310-330
Относительно устойчивые	1,7-2,0	780-950	110-230	330-350
Устойчивые	> 2,0	>950	>230	>350

Высокая устойчивость галечно-валунных русел и особенности транспорта руслообразующего аллювия вносят определенную специфику в гидравлические характеристики потока. Гребни перекатов после спада уровней размываются очень медленно, либо, при образовании отмостки, не размываются вообще. Поэтому в межень перекаты выполняют роль подпорных плотин для вышележащих плесовых лощин, а их гребни создают гидравлическое подобие водослива с широким порогом, скорости течения на котором часто возрастают до величин, лимитирующих судоходство [8]. Рост скоростей течения сопровождается дополнительным (относительно плесовых лощин) падением уровней и глубин на перекатах.

Разработка дноуглубительных прорезей на гребнях перека-тов может встретиться с неблагоприятными последствиями двоякого рода. Механическое удаление отмытки при скоростях течения, недостаточных для ее естественного разрушения, может стимулировать активный размыв и массовое перемещение ранее недоступной для потока аллювиальной толщи, состоящей в значительной мере из более мелких фракций наносов. Продукты размыва, перемещаясь по течению, попадают в зону подпора нижележащих перекатов и вызы-вают их обмеление. С другой стороны, увеличение глубин на корыте переката вызывает "посадку" уровней, величина которой может ликвидировать и даже превысить эффект дноуглубления. Так, на некоторых перекатах верхней Оки (русло здесь галечное) посадки уровней при дноуглублении достигали нескольких десятков санти-метров и были примерно равны толщине снимаемого слоя. Кривая спада при высоких уклонах быстро затухает вверх по течению, но на близрасположенных перекатах (первые километры) падение глубин может быть существенным. Подобные примеры характерны для верхней и средней Лены, Енисея, верхнего и среднего Алдана. Среди прочих неблагоприятных последствий, также связанных с посадкой уровней воды при углублении галечно-валунных русел - обмеление причалов портов, головных сооружений бесплотинных водозаборов и т.д.

Посадки уровней являются, пожалуй, одной из наиболее значительных проблем при регулировании галечно-валунных русел, именно - по причине их относительной недеформируемости, в отли-чие от менее устойчивых песчаных русел, где наибольшие сложности создают собственно русловые деформации. В руслах с мелкозерни-стыми грунтами большой вклад в гидравлическое сопротивление вносит грядовая шероховатость, а, так как параметры донных гряд изменяются вслед за глубинами и скоростями течения, поток сам регулирует шероховатость дна в разные фазы водного режима. Как показал К.В.Гришанин [6], благодаря этому ослабляется связь гид-равлического уклона со скоростью, и уменьшение скорости течения, сопровождающее увеличение глубин на перекатах после дноуглуб-ления, не вызывает уменьшения уклонов, т.е. понижения свободной поверхности потока.

Образование аллювиальных гряд происходит при массовом перемещении донных наносов, причем в галечно-валунных руслах донный грядовый рельеф чрезвычайно беден и слабо трансформиру-ется (или не трансформируется) в сезонном цикле, отражая этап мас-совой остановки движущихся частиц наносов в начале спада поло-водья или крупных паводков. При сравнительно небольшом объеме донного материала зона активно перемещающихся наносов в пери-од прохождения руслоформирующих расходов воды не захватывает всей ширины русла, располагаясь вдоль линии наибольших скоро-стей потока. Так как прекращение транспорта наносов происходит на спаде половодья резко, то наиболее мелководные части гряд-перекатов, их гребни, характеризуются наибольшей крупностью

аллювия, соответствующей положению стрежня потока во время половодья, тогда как седловины перекатов оказываются в перифе-рийных зонах русла. В межень динамическая ось потока, огибая элювированную часть гряды, часто "избирает" направление, перпен-дикулярное оси русла. Гидравлические сопротивления в таком русле жестко определяются формой поперечного сечения потока и зерни-стой шероховатостью дна и слабо зависят от скорости течения. В этих условиях гидравлический уклон пропорционален квадрату ско-рости течения, и даже незначительное уменьшение последней вызы-вает заметный спад кривой свободной поверхности потока. Яркой иллюстрацией этого служит верхняя Лена, где к настоящему време-ни, в результате начавшихся в 1950-х гг интенсивных дноуглуби-тельных работ и фактической ликвидации большинства перекатов, проектные уровни воды снизились по гидropосту Усть-Кут на 1,9 м. Начиная с 1972 г., после достижения гарантированной глубины и ширины судового хода, соответственно, 200 см и 65 м посадка уров-ня стала обгонять искусственное понижение проектного дна [5].

Дополнительный усложняющий фактор на многих реках с галечно-валунным составом наносов - выходы в руслах коренных, обычно скальных пород. Нередко это бывает связано с ограничен-ным поступлением крупнообломочного материала в русло со скло-нов и из притоков, что обуславливает дефицит наносов руслообра-зующих фракций. Вследствие этого поток непосредственно контак-тирует с коренным ложем реки, а русло представляет собой своеоб-разный скальный лоток. Таково, например, русло нижнего Витима в плесе г.Бодайбо - устье р.Мамы. Вместе с тем, локальные выступы коренного ложа могут быть предопределены тектоническими и гео-логическими причинами, что характерно для большинства галечно-валунных рек Восточной Сибири. Увеличение уклона на таких вы-ступках, высокие скорости течения и, как следствие, повышенная транспортирующая способность потока обуславливают возникно-вление местного дефицита наносов и образование скальных "перека-тов" (в кавычки взято из-за условности применения этого понятия, принятого обычно на лоцманских картах и в воднопутевой про-водственной практике).

В геологическом масштабе времени общий дефицит наносов приводит к направленному углублению русел, в результате чего значительная их часть относится к врезанному типу, формируясь в условиях ограниченного развития русловых деформаций. В динамиче-ских врезанных русел существенную роль играет конфигурация корен-ных берегов, оказывающая струенаправляющее воздействие на по-ток. Слой руслообразующих наносов, если он имеется, маломощен, что, вместе со скальными участками, определяет значительную роль рельефа поверхности коренных пород в морфологии дна русла.

Дефицит донных наносов благоприятен с точки зрения заноз-имости дноуглубительных прорезей, однако, он вызывает и ряд проблем. Выходы трудноразмываемых скальных пород определяют расположение порожистых участков, где происходит заметное уве-

личение уклонов и скоростей течения, что затрудняет или даже прерывает судоходство в межень. Часто начало порожистого участка на крупной реке является границей судоходства (например, на Вилюе, Олекме, Витиме, Нижней Тунгуске и др.). Одиночные выступы скальных пород иногда имеют облик эрозионных останцов обтекания с сопутствующими шиверами и скальными "перекатами". Скальные "перекаты" особенно неблагоприятны для судоходства в маловодные годы, когда эффект "водослива с широким порогом" на них приводит к дополнительному понижению уровней и снижению глубины ниже прогнозируемой обычными методами [8].

Скальные выступы, деформируя поле скоростей потока, часто играют роль ядра зоны локальной аккумуляции галечно-валунного материала. Многие перекаты и острова, с поверхности сложенные аллювиальным материалом, обнаруживают на небольшой глубине ядро коренных пород (некоторые перекаты Енисея в нижнем бьефе Красноярского гидроузла, острова на Витиме, Лене, Ангаре). Такие эрозионно-аккумулятивные формы имеют стабильное положение, не смещаясь подобно аккумулятивным грядам по течению реки, но выходы скальных пород, являясь подводным продолжением ядер островов, лимитируют здесь возможности дноуглубления [9]. В крайних случаях приходится применять дорогостоящие и экологически небезопасные технологии - взрывное разрыхление скальной породы с последующей скалоуборкой (например, на Олекминском и Хатын-Тумульском перекатных участках средней Лены).

Одной из наиболее специфических особенностей галечно-валунных и скальных русел, создающих аварийную обстановку на судовых ходах, является наличие в них "камень-одиноц". Поставщиками их являются контактирующие с руслом реки цоколи высоких террас, коренные борта долины и скалы по берегам рек. Особенно часто скопления наиболее крупных обломков (до нескольких метров в поперечнике) встречаются на реках, склоны долин которых покрыты курумами, что характерно для гор Восточной Сибири. Поэтому камни-одиноцы широко распространены на таких крупных реках, как Витим, средняя Лена, верхний Алдан. Чаще всего появление в русле крупных обломков, превышающих по размерам фоновую крупность наносов, является следствием мощного ледохода. Пльвущий лед толщиной 1,5-2м обладает огромной транспортирующей способностью по отношению к обломкам вмержающим в него и попавшим на его поверхность во время ледостава. В местах заторов камни-одиноцы образуют россыпи почти по всей площади русла; при случайном опрокидывании льдин они могут возникнуть в любой части русла, в т.ч. в пределах плесовых лощин, вследствие чего практически все галечно-валунное или скальное русло является опасным для движения судов после ледохода и особенно при наступлении межени. Дальнейшее перемещение камней-одиноц может вновь происходить под влиянием ледохода; кроме того возможно проявление аблювиального эффекта [10], воздействие гидростатического напора в период прохождения фронта волны паводка или возникновение двух-

фазного течения при срыве отмости и насыщении потока взвешенным материалом из залегающей под ней толщи. Не исключается и одновременное воздействие этих факторов. Однако механизм явления пока не познан, как и не поддается прогнозу возможное место возникновения камней-одиноц. Это обуславливает малую эффективность мероприятий по очистке русел рек от камней-одиноц, существенно ограничивающих габариты судового хода, особенно при попадании их на корыта перекатов. Таковы результаты работ по удалению камней-одиноц из русла верхнего Алдана. В то же время на р.Киренге эти работы дали заметный положительный эффект. В последнем случае русло широкопойменное, в основном ответственное на рукава, камни-одиноцы образуются редко и только в местах заторов, которые достаточно хорошо известны; на Алдане русло врезанное, со сложными условиями ежегодного возникновения камней-одиноц.

Опыт путевых работ на верхней Лене и других реках показывает, что дноуглубительные работы в галечно-валунных руслах обязательно должны сопровождаться строительством выправительных сооружений, направленным на компенсацию "посадов" уровней, уменьшение необходимых объемов дноуглубления [5]. По существу, выправление русла должно стать главным принципом создания современных судовых ходов на галечно-валунных и скальных реках.

Извлекаемый из прорезей грунт необходимо складировать в рабочих емкостях русла и использовать для возведения русловыправительных сооружений, концентрирующих поток по трассе фарватера. Наиболее эффективны сооружения меженного регулирования, возводимые с целью стеснения потока при низких уровнях. Понизы, запруды и дамбы весеннего регулирования оказываются очень дорогостоящими, быстро разрушаясь в половодье и паводки, и в целом не только недостаточно эффективны, но могут приводить к противоположному эффекту, т.к. в периоды прохождения руслоформирующих расходов сосредотачивают весь поток наносов в узкой полосе. Остановка движения наносов на спаде уровней, особенно при большом их стоке, может повлечь за собой обмеление судового хода трассы и привести к необходимости увеличения объемов дноуглубительных работ. В наиболее тяжелых грунтовых условиях выправительные сооружения могут оказаться единственным экономически оправданным способом увеличения гарантированных габаритов судового хода. Так, в нижнем течении р. Белой (галечно-песчаное русло) в 50-е-70-е гг. были построены многочисленные понизы и запруды (более 200 между Уфой и Бирском), стеснившие поток на реках. Средняя ширина русла в межень уменьшилась с 400 до 100 м. Гарантированные глубины были увеличены с 1,6 (1960г) до 2,2 (1979г); при этом практически не возросли объемы землечерпания и не произошла существенная посадка уровней.

Однако к возведению выправительных сооружений следует подходить с большими предосторожностями, учитывая устойчивость русла на конкретном участке. Избыточное стеснение потока

может привести к увеличению скорости течения до величин, лимитирующих судоходство, а также вызвать ускоренный размыв дна на корыте переката и неконтролируемую посадку проектного уровня. Примером могут служить деформации группы Ладейских перекатов Енисея у г.Красноярска. Они сформировались в рукаве, ширина которого составляла не более половины ширины меженного русла в Красноярском узле разветвления. Русло этого рукава было стеснено продольными дамбами, ограничившими растекание потока по прирусловым отмелям, так что ширина его на перекатах составила всего 200-350 м при средней ширине русла Енисея около 600 м. Учитывая, что даже при проектном уровне расход воды превышает 2000 м³/с, можно видеть, что стеснение русла вызвало значительное увеличение скорости течения по сравнению с бытовой и потерю руслом устойчивости. Средняя крупность донных наносов здесь - около 40 мм, уклон - 0,30 - 0,35 ‰, коэффициенты Л и Кс в бытовом состоянии соответственно равны 130 и 40. В результате выправления произошел существенный размыв русла на перекатном участке, понижение отметок дна составило за 1967-1991 гг от 0,7 до 1,7 м, а понижение меженных горизонтов воды - более 20 см на верхней границе перекатного участка.

Большая крупность галечно-валунных наносов (крупные валуны имеют в диаметре около 1м) должна учитываться при определении гидравлически допустимых глубин судового хода, понижая расчетную величину не менее, чем на 20-40см из-за неизбежных выступов шероховатости (отдельных валунов).

При трассировании прорезей, в случае необходимости проводить дноуглубительные работы без одновременного возведения выправительных сооружений (например, если последние вызывают рост скоростей течения, затрудняющих судоходство), следует использовать по возможности периферийные зоны русла, где не происходит массового движения наносов в половодья и паводки, в т.ч. - использовать седловины перекатов с крутым изгибом динамической оси потока. При этом прорезь должна не только углубить судовой ход, но и обеспечить сглаживание его поворотов. Подобный подход следует использовать, главным образом, на перекатах, сформировавшихся в местных расширениях врезанного русла, где их гребни представлены осередками.

На одиночных перекатах при разработке прорезей можно пренебрегать "посадкой" уровней и объемом размываемого грунта при разрушении отмостки, т.к. они не скажутся на выше- и нижележащих перекатах. Если же перекаты располагаются сериями, то при планировании дноуглубительных работ необходимо учитывать их неблагоприятные последствия - уменьшение глубины за счет "посадки" уровней на вышележащем перекате и обмеление нижележащего из-за поступления на него продуктов размыва прорези.

В широкопойменном разветвленном русле важен оптимальный выбор судоходного рукава. Таковым при галечно-валунном составе наносов является рукав с относительно меньшей водностью, ко-

торый обычно характеризуется большей глубиной, т.к. основной поток наносов устремляется в многоводный рукав.

Широкое распространение скальных грунтов в руслах валунно-галечных рек накладывает ограничения на проектирование и строительство затонов для отстоя судов или водозаборных сооружений. Наиболее целесообразно использовать устья отмирающих, обмелевших в истоках рукавов, обустроивая их в виде затонов. На незветвленных отрезках русла для строительства затонов следует использовать области, наиболее удаленные от стрежня потока в периоды прохождения волн половодья или паводков. При проектировании следует учитывать также и то, что периферийные области русла при ледоходе имеют пониженные уровни воды по сравнению со стрежневой областью и на подъеме уровней привлекают к себе ледяные поля и многочисленный плывущий по реке хлам. Поэтому устья затонов часто забиваются льдом, и короткие затоны оказываются малоэффективными в эксплуатации. Примером неудачного проекта может служить затон у с.Троицкого в нижнем течении р.Олекмы, созданный в левом коротком рукаве путем перекрытия его истоков плухой дамбой. В весенний период затон заполняется нагромождениями ледяных полей, которые, помимо этого, ответственны и за поступление сюда со льдом крупных глыб и камней - одинцов.

ЛИТЕРАТУРА

- Белый Б.В., Беркович К.М., Зайцев А.А., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Исследование русловых процессов на больших реках Сибири // Геоморфология. 1977. № 3.
- Белый Б.В., Беркович К.М., Борсук О.А., Зайцев А.А., Лодина Р.В., Чалов Р.С., Чернов А.В. Морфология, динамика и регулирование русла р.Киренги в связи с транспортным освоением зоны БАМ // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 7. М.: изд-во МГУ. 1979.
- Беркович К.М., Зайцев А.А., Лодина Р.В., Чалов Р.С. Русловые процессы на больших реках Восточной Сибири с галечно-валунным аллювием // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1985. № 3.
- Беркович К.М., Чалов Р.С. Русловой режим рек и принципы его регулирования при развитии водного транспорта // География и природные ресурсы. 1993. № 1.
- Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995.
- Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. М.: Спорт, 1990.
- Дарбутас А.А., Лодина Р.В., Чалов Р.С. Современный русловой аллювий Немана // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1993. № 5.
- Зайцев А.А. Режим уровней и уклонов на валунно-галечных перекатах и скальных выступах в руслах крупных рек // Метеорология и гидрология. 1989. №12.

9. Зайцев А.А., Савцова Т.М. Скульптурный и аккумулятивный рельеф врезанных русел рек Восточной Сибири и особенности его формирования // Геоморфология. 1994. №4.
10. Лодина Р.В., Чалов Р.С. Бульжные мостовые на больших реках // Природа. 1994. № 7.
11. Маккавеев Н.И. Гидравлическая типизация эрозионного процесса // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 3. М.: изд-во МГУ. 1973.
12. Маккавеев Н.И., Литвин Л.Ф., Хмелева Н.В. Использование транспортирующей способности потока в практических целях // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1970. № 2.
13. Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. М.: изд-во МГУ. 1986.
14. Мирцхулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеиздат. 1988.
15. Проектирование судовых ходов на свободных реках. Труды ЦНИИЭВТ. Вып. 36. М.: Транспорт. 1964.
16. Работа водных потоков. М.: изд-во МГУ. 1987.
17. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука, 1980.
18. Русловой режим рек Северной Евразии. М. 1994.
19. Чалов Р.С. Типы русловых процессов и принципы морфодинамической классификации речных русел // Геоморфология. 1996. № 1.
20. Reid I., Frostick L., Layman J. The influence and nature of bedload transport during flood flows in coarse-grained alluvial channels // Earth Surf. Proc. Landf. V.10, 1985.

*Г.П.Кумсинашвили - член-корреспондент АВН,
А.В.Христофоров - член-корреспондент АВН*

Московский государственный университет

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКИ ВИЛОЙ И ПРОБЛЕМЫ СУДОХОДСТВА

Создание водохранилищ оказывает очень существенное и в то же время разнообразное влияние на хозяйство прибрежных районов как в зоне подпора, так и в нижних бьефах гидросооружений. С другой стороны, комплексное использование водохранилищ встречает трудности, связанные с тем, что интересы разных отраслей водного хозяйства входят в противоречия друг с другом и с требованиями охраны водной среды и прилегающих территорий. Наглядным примером такой ситуации является комплексное использование водохранилища Вилкойской ГЭС.

Рост запросов потребителей электроэнергии привел к увеличению нагрузки на Вилкойскую ГЭС. Это обстоятельство, а также отсутствие ввода новых энергоустановок привело к работе мно-

гнетней емкости Вилкойского водохранилища и к уменьшению специальных навигационных попусков в нижний бьеф ГЭС. В результате, резко ухудшились условия судоходства; возникло противоречие интересов гидроэнергетики и водного транспорта. Дальнейший рост нагрузок и сокращение специальных попусков может отразиться также на рыбном хозяйстве и экологическом состоянии реки.

С целью комплексного решения этой проблемы разработана методика прогноза выработки энергии на Вилкойских ГЭС в зависимости от запасов воды в водохранилище, гидрологического режима реки Вилкой, прогноза дождевых паводков на притоках Вилкой и попусков из водохранилища.

Гидрологическая характеристика р.Вилкой

Вилкой - одна из самых полноводных рек Восточной Сибири. Средний многолетний расход воды составляет у пос. Чернышевский около 600 м³/с, у Сунтара - около 800 м³/с, в районе устья - около 900 м³/с. Годовой сток равен 49,8 км³, слой стока составляет 110 мм, модуль стока 3,5 л/с.км² (данные по г/п Хатырьк-Хомо). Основные истоки: справа Улахан-Вава, Чиркуо, Чона, Улахан-Ботуобуя, Очугуй-Ботуобуя; слева Ахтаранда, Марха (ср. год. расход 410 м³/с), Анг (130 м³/с) (рис. 1).

С учетом природных условий и внесенных в них изменений рождением ГЭС, р. Вилкой можно разделить на четыре участка: верхний участок - от истока до устья р. Чиркуо (длина 938 км), участок водохранилища (длина 397 км), средний участок - от пос.Чернышевский до устья р. Мархи (длина 797 км) и нижний участок - от места впадения р. Мархи до устья (длина 518 км). На верхнем участке р. Вилкой вначале протекает по болотисто-озерной равнине, извилистым русле при малом падении, а затем по горному району. Ширина долины до 400 м, в каньонообразных сужениях - не более 20 м. Русло нередко порожистое, глубиной в низкую воду от 0,3-0,5 м на порогах до 4-5 м на плесах.

В пределах водохранилища река представляет озеровидное расширение, местами до 10 км.

На среднем участке до с.Сунтар долина носит полугорный характер, русло часто порожистое, последний крупный порог Кучугуй-Хана находится на 1174-м км. Ниже с. Сунтара русло сначала разрезает врезанные излучины, но затем становится широкопойменным, меандрирует, а в нижнем течении - разветвляется на рукава [1].

Питание р. Вилкой смешанное, с преобладанием снегового. Основное питание меньше снегового, грунтового в условиях вечной мерзлоты почти отсутствует. Водный режим характеризуется высоким весенним половодьем, систематическими летне-осенними паводками и низким стоком зимой.

Весеннее половодье начинается, как правило, во второй декаде мая при ледоставе. Максимальные расходы (в районе пос.Чернышевского - до 12000 м³/с, в низовьях - до 20000 м³/с) проходят обычно во второй половине мая при открытом русле. Подъем воды достигает 10-15 м. Доля стока весенних месяцев (май, июнь)