

УДК 551.311. 21: 627.141.1

**ВОДОЛЕДЯНЫЕ СЕЛИ. К МЕХАНИЗМУ ФОРМИРОВАНИЯ  
ВОДОЛЕДЯНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Доктор геогр. наук

Б.С. Степанов

Доктор техн. наук

Р.К. Яфязова

В.В. Жданов

*Дано описание образования водоледяных конструкций, разрушение которых может приводить к формированию катастрофических водоледяных селей. Показано, что механизм водоледяного селя принципиально отличается от механизма волн, образующихся при разрушении заторов и зажоров.*

Катастрофические селевые процессы характеризуются, как правило, лавинообразным нарастанием расхода и объема грязекаменных потоков. Их максимальные величины зависят от многих факторов, главными из которых являются наличие и состав рыхлообломочных пород, морфометрические характеристики пути их движения и др. Эти качества в полной мере присущи и ниже описанному водоледяному процессу, что позволяет отнести его к селевым явлениям.

Особенности процессов образования и трансформации характеристик водоледяных селей:

- практически вся масса водоледяного селя находится ниже (по течению реки) места его зарождения;
- расход, объем и скорость водоледяного селя по мере его удаления от места зарождения сначала лавинообразно увеличиваются, а затем, при выходе его на малые уклоны, широкую пойму или конус выноса, уменьшаются.

Принципиальным отличием явлений, вызываемых прорывом заторов и зажоров от водоледяных селей является то, что основная масса воды, льда и снега, образующая прорывную волну (в результате разрушения заторов и зажоров) накапливается в верхнем бьефе заторов и зажоров; высота прорывной волны и ее скорость уменьшаются по мере удаления волны от места, где образовался затор (зажор).

Лавинообразное увеличение расхода и объема потока, вне зависимости от его природы, имеет место при наличии положительной обратной связи, выражающейся в том, что пророст расхода находится в прямой зависимости от величины расхода. Так, при формировании грязекаменных

селей (в ходе эрозионно-сдвиговых селевых процессов) вовлечение в селевой процесс дополнительных порций рыхлообломочных пород может (в определенном диапазоне плотности селевой массы) приводить к увеличению энергии потока и возрастанию эродирующей способности селевой массы, благодаря чему приращение расхода на единицу длины пути движения селя будет увеличиваться. Подобным образом может быть объяснено лавинообразное увеличение расхода снежной лавины в ходе вовлечения снега ее нижней поверхностью. По аналогии с вышесказанным, можно ожидать рост характеристик одиночной волны в реке. Однако, как показывает практика, движение одиночных волн в реках не приводит к увеличению их характеристик. По мере движения, в результате распластывания, высота волны и скорость ее движения со временем уменьшаются.

Передняя часть поверхности водолеяного селя может быть названа его фронтом. Процесс вовлечения водолеяных конструкций и снега в тело селя происходит во фронтальной зоне селя. Механизм этого процесса до настоящего времени детально не изучен, однако, скорее всего, он не должен принципиально отличаться от такового текучих снежных лавин [1]. Ступенеобразная форма водолеяных образований на горных реках, текущих на значительных уклонах (2...5°), крайне благоприятна для упомянутых выше механизмов увеличения расходных характеристик водолеяных селей. Надвигаясь, под действием силы инерции, на практически горизонтальную поверхность очередной водолеяной ступени и взламывая ее, фронтальная часть потока увеличивает на какое-то время свою глубину практически на высоту водолеяной ступени, ее высота порой может достигать 3 м. Образующаяся при этом одиночная волна распространяется как вниз, так и вверх по течению реки. В результате такой «накачки» размеры тела селя увеличиваются. Подобным образом формируется волна грязекаменного селя в условиях ограниченных запасов в русле рыхлообломочных пород, принимающих участие в селеформировании. После прохождения водолеяного селя русло реки и (частично) пойма зачищаются ото льда и снега, послеселевой паводок практически отсутствует.

Возможен вариант, когда водолеяные конструкции вовлекаются в тело водолеяного селя его головной нижней частью. Эти механизмы могут действовать совместно или поочередно в зависимости от скорости движения селя и геометрии водолеяных конструкций, расход воды в реке после прохождения водолеяного селя близок к меженному.

Правдоподобным дополняющим механизмом лавинообразного увеличения характеристик водолеяных селей может быть и опережение в головной части верхними слоями потока нижних, обрушение их вниз, вызывающее разрушение расположенных ниже по течению водолеяных конструкций, которые, будучи разрушенными, включаются в движение как под действием селя, так и силы тяжести.

Нетрудно видеть, что вне зависимости от механизма вовлечения водолеяных масс в движение, важная роль в образовании водолеяных селей принадлежит водолеяным конструкциям, выполняющим функции аккумуляторов водолеяных масс, разрушение которых не требует больших энергетических затрат и позволяет эффективно трансформировать потенциальную энергию водолеяной масс в кинетическую энергию потока.

**Образование водолеяных конструкций.** Процесс замерзания горных рек характеризуется совокупностью ледяных образований: начиная от появления первичных кристаллов льда поверхностного и внутриводного происхождения, и кончая формированием ледяного покрова. Интенсивность ледообразования и его характер определяются условиями теплообмена воды с атмосферой и горными породами, вмещающими русло водотока, притоком тепла с грунтовыми водами, морфометрическими характеристиками русла и особенностями течения воды в различных точках сечения потока, физико-механическими характеристиками льда, формирующего водолеяное образование и т.д.

Известно, что в зависимости от интенсивности ледообразования ледяной покров на реках образуется в результате:

- роста и смыкания заберегов (первый тип);
- образования, движения и смерзания поверхностного льда (второй тип);
- образования, движения и смерзания шуги (третий тип).

Необходимым условием ледообразования является переохлаждение воды до температуры ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , как правило, на несколько сотых (десятых) долей градуса. Если температура воздуха отрицательная, но незначительно отличается от нуля, а скорость течения воды составляет первые доли метра в секунду, ледяной покров образуется большей частью в результате роста и смыкания заберегов и «венцов» (образующихся вокруг крупных валунов, выступающих над поверхностью воды). При скорости течения воды больше  $0,2\text{ м/с}$  и температуре воздуха ниже минус  $8...10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в результате интенсивных потерь тепла с открытой водной поверхности и перемешивания переохлажденной воды, распределение интенсивности

ледообразования по глубине потока приближается к равномерному. При этом происходит образование внутриводного льда. Промежуточные значения перемешивания характеризуются развитием процесса образования поверхностного льда и шуги [3].

Под шугой понимают рыхлые скопления льда, возникающие из всплывшего на поверхность внутриводного льда, снежуры, сала, мелкобитого льда и заберегов [4]. Для большинства горных рек, по мнению А.Н. Чижова [5], характерно формирование шуги из кристаллов льда, образующихся непосредственно в потоке и на его поверхности, в меньшей мере – в результате всплытия донного льда. Окатанную форму шуга приобретает в процессе ее движения в потоке независимо от природы её образования.

Характерной особенностью ледового режима горных рек является образование заберегов. С установлением температуры воздуха ниже 0 °С, забереги быстро растут в ширину, особенно на участках с малыми скоростями течения воды. Увеличение размеров заберегов происходит за счет примерзания шуги и замерзания наплесков воды на вновь формирующихся фрагментах заберегов. Особенно быстро забереги увеличивают свои размеры в процессе обильных снегопадов. Попав на забереги вблизи кромки ледяного покрова, снег пропитывается водой заплесков и быстро замерзает. Всплывший внутриводный лед, снежура, забереги и т.д. заполняют часть живого сечения потока, вызывая стеснение потока и подъем его уровня. Вода, насыщенная шугой, разливается по поверхности заберегов, смачивает лежащий на их поверхности снег, что приводит к образованию характерного ледяного покрова с прослойками шуги, обладающего низкой теплопроводностью. Такой покров может в значительной мере уменьшить интенсивность образования шуги.

Ледовый режим рек характеризуется сменой ледовых явлений, в том числе формированием зажоров, заторов и зажорно-заторных явлений. Заторы, представляющие собой нагромождения льдин во время весеннего ледохода, – явление, практически не имеющее место на горных реках с расходами первые кубические метры в секунду и текущими на уклонах 1...2° и менее. Обусловлено это тем, что толщина ледяного покрова к наступлению весеннего потепления соизмерима или даже превышает глубину водных потоков, льдины представляют собой фрагменты заберегов, лежащих на припойменных участках.

Зажоры льда образуются в осенне-зимний период в ходе формирования ледяного покрова при интенсивном шугообразовании, когда количество и

плотность шуги достаточны для формирования зажорных скоплений. Зажорообразование начинается, когда в русле возникает препятствие, достаточное для подпора, который обеспечит остановку шуги.

Дальнейшее развитие зажора вверх по течению крупных рек протекает по следующему сценарию [6]. Шуговые скопления, упираясь в предшествовавшие шуговые массы, останавливаются, образуя сплошной шуговой ковер. При длине ковра 300...400 м сила влечения шуги потоком превышает сопротивление структуры шугового поля, в результате чего его нижняя часть подвергается интенсивной деформации. Следствием этого является увеличение толщины шуговых отложений от 0,5...0,7 до 1,2...1,5 м. Частота таких подвижек зависит от расхода шуги и планового очертания русла. Часть шуги проходит транзитом под зажором, несмерзшаяся часть шуговых отложений может частично размываться и уноситься за пределы зажора. В результате образования зажора уровень воды на протяжении зажора постепенно растет. В среднем течении р. Нарын (при ширине русла 30...50 м) толщина отложений шуги может достигать 5...8 м. Разрушение зажора происходит при уменьшении расхода поступающей сверху шуги, в результате чего размыв шуги начинает преобладать над отложением. Нижняя часть зажора уносится потоком, верхняя, после проседания, обрушается и также уносится рекой. На более мелких реках, при значительных похолоданиях, «в пределах долин с валунно-галечниковым дном поток при образовании шуги и донного льда разливается по пойме. Насыщенная шугой вода замерзает слоями, что приводит к образованию «наледно-зажорного» ледостава толщиной 1...2 м. Через некоторое время поток промывает себе русло в отложениях шуги подо льдом и дальнейшее ледообразование прекращается. Наледно-зажорный ледостав формируется на участках большой протяженности, не искажая существенно продольный профиль потока, и, по сути, может быть только условно отнесен к разряду зажорных явлений» [6]. При разрушении заторов и зажоров вниз по течению распространяется прямая положительная волна, взламывающая ледовый покров, перераспределяющая заторные скопления, при этом перемешаются огромные массы воды. Это приводит к резкому увеличению уровня воды и кратковременному затоплению поймы реки [2]. Однако высота волны, скорость ее продвижения во времени и пространстве уменьшаются.

Водолеяные конструкции, приводящие к формированию водолеяных селей на горных реках Илейского Алатау, возникают при среднесуточной температуре воздуха ниже минус 10 °С в ходе образования льда

как в поверхностном слое водного потока, так и по всей его глубине. Условия, благоприятствующие этим процессам, создаются при резком понижении температуры воздуха, когда ледяной покров на реках еще практически не начал формироваться: теплообмен воды с воздушными массами происходит на относительно больших площадях при малой глубине водного потока и интенсивном его перемешивании.

Особенности образования водолеяных конструкций на горных реках Казахстана обусловлены морфологией русел, их большими (2...5° и более) уклонами, относительно небольшими (доли, единицы кубометров в секунду) расходами воды в зимний период времени.

Отмостка русел горных рек образуется водными потоками, транспортирующими большое количество наносов в конечных фазах селевых процессов. Как правило, это грязекаменные сели большой плотности, с расходами многие десятки, сотни и тысячи кубометров в секунду, включающие в себя твердые частицы с поперечными размерами до 10 м и даже более. В конечной фазе селевых процессов, в результате уменьшения расхода селевых потоков, часть крупных камней и глыб задерживается в руслах, создавая условия для остановки относительно более мелких фракций наносоводных потоков. Это приводит к тому, что русло приобретает ступенеобразный характер. В осенний, а в некоторых случаях и летний периоды года, крупные фракции отмостки выступают над поверхностью водных потоков.

Особенности руслообразования горных рек описываемого региона приводят к тому, что глубина потока по всей его ширине может изменяться в больших пределах, становясь практически нулевой как у берегов, так и камней, выступающих из воды. Следствием этого является различный характер течения воды в потоке.

Переохлаждение воды приводит к образованию поверхностного льда на участках русла с малыми глубинами в виде заберегов и «венцов» вокруг камней, выступающих над поверхностью воды. Если теплообмен между водой и воздухом невелик, ледяной покров формируется в результате роста и смыкания заберегов и «венцов», перемещения и смерзания поверхностного льда и шуги. На образование льда затрачиваются значительные объемы воды, однако уровень воды в реке не претерпевает существенных изменений. Уменьшение расхода воды, вследствие ее затрат на образование ледяного покрова и русловое задержание, в определенной мере компенсируется увеличением гидравлического сопротивления, вызы-

ваемого ростом величины смоченного периметра (за счет образования ледяного покрова, касающегося водной поверхности, и приводящего к уменьшению скорости течения воды).

Экранирование потока ледяным покровом затрудняет теплообмен между водой и воздухом, тем самым, уменьшая возможность образования внутриводного льда и, как следствие, выход воды на поверхность ледовых образований. Уровень воды в реке при описанном сценарии образования ледяного покрова незначительно отличается от такового, существовавшего до образования ледяного покрова.

Если процесс образования ледяного покрова происходит в результате резкого перепада температур от положительных значений к отрицательным, ледообразование происходит во всей массе воды. На участках рек с небольшими скоростями течения процессы ледообразования и формирования ледяного покрова протекают в поверхностном слое воды. На участках активного перемешивания воды внутриводный лед образуется по всей глубине потока. Переохлаждение водных масс сопровождается образованием шуги, движением ее вниз по течению. Формирование ледяного покрова в местах малой ледопротускной способности происходит путем образования перемычек между заберегами и «венцами», образующимися вокруг камней, выступающих над поверхностью потока. В результате остановки, сплочения и замерзания шуги на участках с малой водопротускной способностью, последняя еще больше уменьшается. Это приводит к увеличению уровня воды с образованием заводей, на поверхности которых, из-за малых скоростей течения, образуется лед. В результате увеличения гидравлического сопротивления и глубины потока скорость течения уменьшается. Это приводит к дальнейшему увеличению уровня воды. Из-за увеличения глубины потока скорость течения и, как следствие, интенсивность перемешивания, уменьшаются. Тем самым, условия образования шуги ухудшаются. В большинстве ситуаций происходит выход воды на поверхность льда. Путь, проходимый водой по поверхности льда до замерзания ее фронтальной части, зависит от толщины слоя воды и ее температуры, а также теплообмена между водой, льдом и атмосферой. Движение упомянутого слоя воды сопровождается намерзанием льда на ледяной поверхности, по которой течет вода, а также образованием тонкого ледяного покрова на поверхностном слое воды.

Остановка движения слоя воды в результате замерзания его фронтальной зоны приводит к дальнейшему увеличению уровня воды в реке и

выходу ее на вновь образованный ледяной покров и т.д. При этом образуется «слоеный пирог», состоящий из тонких прослоев воды и льда.

На рис. 1 приведена фотография фрагмента одной из водолеяных конструкций. В ходе образования водолеяных конструкций формируются десятки прослоек, в совокупности составляющие ступени, высотой до 2,5...3 м в течение 3...4 суток (рис. 2). В результате русло и, в значительной мере, пойма реки заполняются водолеяными образованиями, объем которых (на единицу длины русла), может более чем на порядок превышать объем воды в русле при прохождении выдающихся дождевых паводков в теплый период года.



*Рис. 1. Результат многослойного формирования фронтальной части водолеяной конструкции.*



*Рис. 2. Образование водолеяной ступени.*

Подпитка воды теплом грунта, вмещающего русло реки, а также экранирование прослоек воды от холодных воздушных масс вышераспо-

ложенными прослойками льда, приводит к тому, что «слоеный пирог» может сохраняться несколько суток. Это делает всю конструкцию крайне неустойчивой к воздействию внешних и внутренних сил.

Наличие воды в прослоях подтверждается ее истечением (в ходе локального разрушения водолеяных конструкций) с образованием «сталактитов» и «сталагмитов» при температуре воздуха минус 10...15 °С, исключающей возможность образования воды путем таяния льда или снега (рис. 3).



*Рис. 3. Образование «сталактитов» и «сталагмитов» в ходе постепенной отдачи воды из слоеной ледовой толщи.*

В ситуациях, когда интенсивность образования шуги велика, а относительно высокая скорость течения воды на поверхности заводи препятствует образованию льда на ее поверхности, водолеяные ступени образуются в основном в результате остановки, сплочения и замерзания шуги.

Формирование водолеяных конструкций приводит к существенному изменению водного режима реки. Как правило, водолеяные сели на северном склоне Илейского Алатау образуются в конце ноября – начале января, то есть в меженный период. Поскольку формирование водолеяных конструкций до состояния, при котором их разрушение может принимать катастрофический характер, занимает 4...7 дней, а атмосферный температурный фон исключает поступление талых вод в реки, можно считать, что питание рек происходит только за счет грунтовых вод, дебит которых в этот период практически не изменяется.

Следовательно, в ходе формирования водолеяных конструкций и вызванного им увеличения уровня воды в реке, сопровождающегося накоплением воды в верхнем бьефе этих конструкций, расход воды в реке будет уменьшаться по мере ее движения на более низкие высотные отметки. Уменьшение расхода воды приведет к тому, что формирование водолея-

ных конструкций будет происходить в условиях уменьшения пропускной способности каналов, образующихся в них, при одновременном сокращении теплообмена воды с холодными воздушными массами. Это может приводить к увеличению температуры воды и льда в теле водолеяных конструкций и, как следствие, ослаблению их прочности. Тем самым создаются предпосылки для разрушения водолеяных конструкций вследствие возрастания расхода воды, которая затрачивалась ранее на их интенсивный рост.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Божинский А.Н., Лосев К.С. Основы лавиноведения. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 280 с.
2. Болотников Г.И. Расчет параметров волны прорыва затора льда // Труды ГГИ. – 1986. – Вып. 323. – С. 28–30.
3. Донченко Р.В. Модель процесса замерзания рек // Труды ГГИ. – 1980. – Вып. 270. – С. 3–11.
4. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 308 с.
5. Чижов А.Н. К вопросу об исследовании шуговых явлений на горных реках // Труды ГГИ. – 1958. – Вып. 65. – С. 84–99.
6. Чижов А.Н. Особенности зажорообразования на горных реках // Труды ГГИ. – 1972. – Вып. 192. – С. 44–52.

РГП «Казгидромет», г. Алматы

#### **СУЛЫ МҰЗДЫҚТЫҚ СЕЛДЕР. СУЛЫ МҰЗДЫҚТЫҚ СЕЛДЕР ТҮЗІЛІСІНІҢ ҚАЛЫПТАСУ МЕХАНИЗМДЕРІНЕН.**

Геогр. ғылымд. докторы	Б.С. Степанов
Техн. ғылымд. докторы	Р.К. Яфязова
	В.В. Жданов

*Сулы мұздықтық түзілістің қалыптасуына сипаттама берілді, олардың бұзылуы апатты сулы мұздықтық селдердің қалыптасуына әкеліп соғуы мүмкін. Сулы мұздықтық селдердің механизмі сең буу мен анжыр кептемесінің бұзылуы барысында пайда болатын толқындардан өзгеше.*