

## ЭФФЕКТ ГИСТЕРЕЗИСА В СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СООТНОШЕНИЯ РАСХОДА И МУТНОСТИ ВОДЫ РЕК КРИОЛИТОЗОНЫ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

© 2012 г. Н. И. Тананаев

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН*

*663200 Игарка Красноярского края, 1-й микрорайон, д. 8А*

*E-mail: nikita.tananaev@gmail.com*

Поступила в редакцию 04.05.2011 г.

Исследованы закономерности проявлений гистерезисного эффекта в соотношении расходов и мутности воды рек криолитозоны Сибири и Дальнего Востока в отдельные фазы водного режима. Рассмотрены существующие типизации гистерезисных кривых, механизмы формирования пиков мутности на реках криолитозоны. На основании данных режимных наблюдений определены преобладающие типы гистерезисных кривых расход–мутность для 27 гидрологических постов на 16 крупных реках региона. Выявлена роль мерзлотных условий и процессов в формировании гистерезисного эффекта, установлена связь между типом гистерезисной кривой и преобладающим источником наносов.

*Ключевые слова:* соотношение расход–мутность, гистерезисный эффект, геофизиологические условия.

Формирование стока наносов и их перемещение по русловой сети – важный фактор, определяющий условия и возможности хозяйственной деятельности, связанной с комплексным использованием рек и прилегающих участков речных долин. Количественные и режимные характеристики стока наносов определяют объем и режим заносимости водохранилищ, качество воды и условия существования водных биоценозов, оказывают влияние на функционирование объектов водоочистки и водоподготовки. Являясь одним из факторов русловых процессов, они воздействуют на динамику руслового потока, состояние водного пути (в особенности на перекатных участках), условия проектирования сооружений в прирусловых зонах рек [8]. Сток наносов остается одним из наименее изученных компонентов суммарного речного стока и элементов динамики русловых систем. В наибольшей степени это относится к рекам криолитозоны Сибири и Дальнего Востока, где мерзлотные условия влияют на специфику закономерностей формирования и транспорта наносов, а сеть централизованных наблюдений редка и не всегда репрезентативна.

Динамика стока наносов тесно связана с гидрологическим режимом водотока, а также с процессами денудации на его водосборе. Водный режим в заданном створе зависит от источников формирования стока (снеготаяние, дождевое событие), процессов его движения по водосбору (“хортоновский”, подповерхностный или внут-

рипочвенный сток, концентрация стока в малые водотоки, перемещение по русловым системам), характеристик добегающих с отдаленных частей водосбора. Интенсивность процессов денудации, выраженная через мутность потока в заданном створе, определяется количеством и объемом потенциальных источников наносов, их связью с приемным водотоком [1], а также потенциальной возможностью поступления материала в русловую сеть под действием тех или иных процессов (так называемой “доступностью” наносов) [27].

По результатам анализа обширного массива наблюдений исследователями получено эмпирическое соотношение

$$s = aQ^m, \quad (1)$$

где  $Q$  и  $s$  – наблюдаемые (моментальные) величины расхода воды и мутности речного потока соответственно,  $a$  и  $m$  – эмпирические коэффициенты. Приведенная функциональная зависимость адекватно применима только к полю точек за многолетний период, для которого она приблизительно соответствует центральной линии [7]. Кроме того, использование этого уравнения для аппроксимации набора данных с целью получения в дальнейшем расчетной модели приводит к существенной недооценке суммарного стока наносов (с ошибками до 50%) [20]. Основные причины недооценки – неучет внутригодовой изменчивости стока наносов, поскольку лишь в редких случаях связь расхода и мутности воды имеет ли-

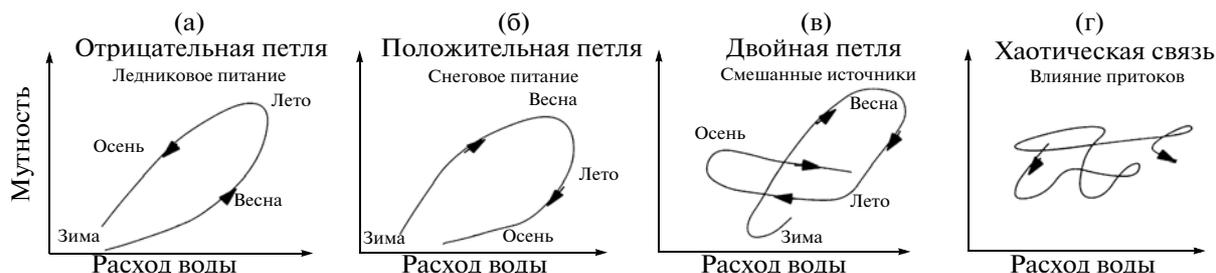


Рис. 1. Внутригодовая изменчивость связи мутности и расхода воды (по [28]).

нейный характер [32]. В течение года изменения расхода воды и мутности потока приводят к значительным отклонениям от линии статистической связи, образуя кривые и петли разнообразных форм, которые могут быть получены как для отдельных сезонов и года в целом [29–30], так и для отдельных гидрологических событий – паводков, штормовых событий [1, 19, 27].

#### ЭФФЕКТ ГИСТЕРЕЗИСА: ВРЕМЕННОЕ МАСШТАБИРОВАНИЕ И ТИПИЗАЦИЯ

Неоднозначность связи расхода и мутности воды, приводящая к тому, что при одном и том же расходе воды мутность может изменяться в широких пределах, принято называть эффектом гистерезиса [21]. Кривая гистерезиса применительно к соотношению расхода и мутности воды в общем случае имеет петлеобразную форму и состоит из соединяющихся между собой ветвей подъема и спада, соответствующих периоду увеличения расхода воды до момента пика, и последующего его снижения. В случае превышения ветви подъема над ветвью спада кривая гистерезиса направлена по часовой стрелке и называется положительной, в обратном случае – отрицательной.

В отдельные сезоны и за год в целом основным фактором формирования нелинейности в соотношении расхода и мутности воды являются различия в источниках питания рек, скорость движения волн расходов и мутности по гидрографической сети, а также одновременность протекания отдельных эрозионных процессов [28] (рис. 1). Весенние талые снеговые воды на реках с преимущественно ледниковым питанием имеют меньшую мутность относительно вод ледников, тающих в середине и конце лета, что приводит к формированию отрицательной кривой гистерезиса (рис. 1а). На реках с преимущественно снеговым питанием максимум мутности приходится на период снеготаяния, в дальнейшем мутность значительно снижается, в этом случае формируется положительная кривая (рис. 1б). График связи в виде двойной петли характерен для рек, в пределах водосбора которых имеется один или несколько источников поступления наносов, в

режиме функционирования которых наблюдается сезонная изменчивость. В этом случае снижение расходов воды в осенне-летний период не связано с уменьшением значений мутности (рис. 1в). Хаотическая связь (рис. 1г) характерна для участков крупных рек с малыми значениями мутности (например, вытекающих из озер), где значительную роль играют притоки, определяющие асинхронность наступления отдельных фаз водного режима, а также для арктических рек [28].

Эффект гистерезиса характерен и для наиболее динамичных отрезков годового гидрографа – отдельных гидрологических событий (паводков, паводков, штормов). Его учет связан с понятием “эффективного”, или “доминантного”, расхода и выводами Уолмэна и Миллера, согласно которым основное количество наносов проходит через заданный створ за отдельные события крайне малой повторяемости. Следовательно, роль остальных периодов года даже в многолетнем разрезе пренебрежимо мала [33]. Использование различных уравнений вида (1) для ветвей подъема и спада значительно повышает точность расчетного определения стока наносов как за единичное событие, так и в сумме за год [30]. Связь типов гистерезисных  $s(Q)$ -кривых с источниками наносов и их истощением предложено использовать как идентификатор для определения преобладающего источника наносов в отдельные фазы водного режима. С помощью анализа кривых гистерезиса проводится оценка роли отдельных факторов и процессов в формировании суммарного потока наносов на водосборе и его доставке в приемный водоток [26].

В многоводную фазу водного режима вид связи расхода и мутности воды  $s = s(Q)$  зависит от интенсивности изменения этих параметров во времени, от синхронности их колебаний. Выделение типов кривых связи  $s(Q)$  на основе качественного сопоставления идеализированных графиков хода мутности и гидрографов с различными соотношениями времени прохождения и высоты пиков, а также их асимметрии выполнена в [32]. Работа не предлагает строгого, математически обоснованного подхода к формализации гидрографов и графиков хода мутности; на качественном уровне

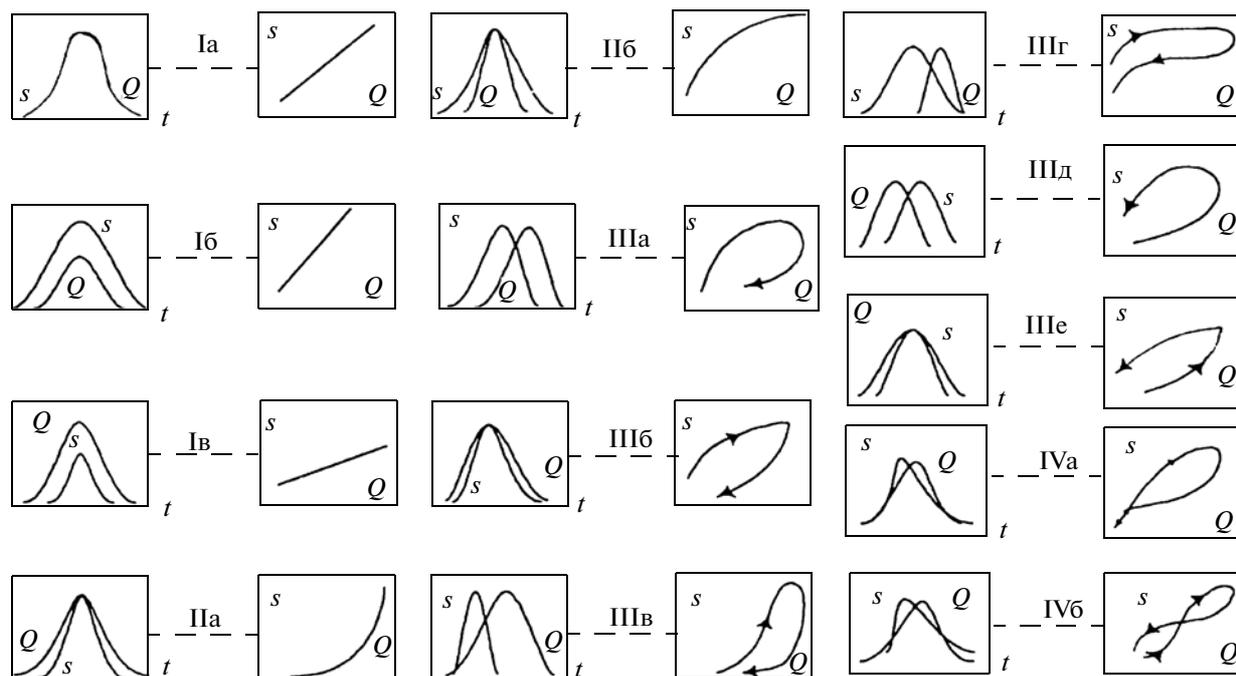


Рис. 2. Основные типы связей между мутностью воды  $s$ ,  $\text{г/м}^3$ , и расходом воды  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  (по [32] в модификации Н.И. Алексеевского [1]),  $t$  - время, с.

выделено пять основных классов кривых  $s(Q)$ -связи (редуцированных Н.И. Алексеевским [1] до 4), которые в свою очередь делятся на 13 типов (рис. 2).

Типы кривой Ia–Iв и IIa–IIб, описывающие однозначную (прямолинейную или криволинейную) связь между расходом и мутностью воды, по материалам натуральных наблюдений различных авторов, имеют наименьшую встречаемость [31]. Для их формирования необходима синхронность в прохождении пиков расхода и мутности воды и одинаковая интенсивность изменений этих характеристик во времени. Это условие выполняется в период прохождения резких паводков на малых водосборах, низкая инерционность которых обеспечивает быструю доставку в поток эродированного материала [4], или при нахождении основного источника поступления наносов в непосредственной близости от створа поста. Отсутствие ограничений в количестве потенциально доступных для размыва наносов также может приводить к тому, что мутность потока в период прохождения единичного события связана только с транспортирующей способностью потока и его гидравлическими характеристиками [6, 18].

Фазовое смещение пиков  $Q$  и  $s$ , изменение асимметрии и полноты графиков приводит к формированию в их соотношении кривых гистерезиса (тип III) как положительных (IIIa–IIIг), так и отрицательных (IIIд–IVе), являющихся наиболее изученными и встречаемыми при натуральных наблюдениях по всему миру [15]. Формирование

положительных петель объясняется в общем случае снижением величин мутности в период прохождения пика расходов или резким их увеличением на подъеме гидрографа.

Основные причины уменьшения мутности потока – уменьшение количества наносов на водосборе или в русле, потенциально доступных для смыва в данное эрозионное событие, до прохождения максимума расхода воды либо асинхронное поступление наносов из вышерасположенных притоков [16, 26]. В случае хорошей инфильтрационной проницаемости грунтов на водосборе мутность потока может снижаться из-за разбавления дождевого стока осветленными подземными водами, что подтверждается успешным применением упрощенной модели смешения дождевого и подземного стоков для прогноза величин мутности р. Дарт (Девон, Великобритания;  $F = 46 \text{ км}^2$ ) в течение дождевого паводка [31].

К снижению мутности потока на спаде расходов приводит резкое снижение интенсивности дождя и энергии капельной эрозии, приходящееся на ветвь спада гидрографа [25]; прекращение действия малых эрозионных форм или ограничение доставки ими материала в русло водотока [26]; формирование на спаде расходов подобия аллювиальной отморстки, препятствующей поступлению в поток дисперсных частиц; увеличение крупности взвешенного материала после прохождения пика расходов [22]; оплывание раз-

мываемых берегов и их укрытие слоями дерна с хорошо закрепленной корневой системой [14].

Повышенные значения мутности в начале события, также приводящие к формированию положительных петель гистерезиса, могут быть связаны с размывом руслового аллювия, отложенного на спаде предыдущего гидрологического события, хорошо сортированного и менее связанного [17]. Кроме того, волны дисперсного материала приурочены к волне максимальной скорости, проходящей через створ раньше волны максимального расхода (следствие из уравнения неразрывности для волны половодья/паводка), что также приводит к превышению значений мутности на ветви подъема над таковыми на ветви спада [14].

Отрицательные петли гистерезиса (тип IIIд–IIIе) формируются при относительно пониженной мутности на подъеме половодья и ее значительном увеличении после прохождения пика водности. Причины, ограничивающие поступление наносов во время увеличения расходов, – распространение многолетнемерзлых грунтов на водосборе и в русле реки [10], наличие в русле аллювиальной отмытки [22]. Резкое повышение мутности потока на спаде связывают с инерционностью водосборов и более поздним добеганием волны мутности с отдаленных частей водосбора [16, 31]. В условиях активного развития криогенных процессов значительный вклад в повышение мутности потока, не связанное с увеличением расхода воды, могут внести формирование и обрушение термоэрозионных карнизов, солифлюкционное движение грунтов на поверхности водосбора, береговые криогенные оползни [11–14, 23].

Кривые  $s(Q)$ -связи несколько усложняются при изменении асимметрии пиков мутности и расхода, что приводит к появлению на графиках замкнутых петель и перекрещивающихся ветвей подъема и спада (тип IV). Этот тип связи имеет два подтипа, различающихся синхронностью наступления максимумов мутности и наносов соответственно. Подъему уровней соответствуют меньшие, а спаду – большие концентрации взвеси (тип IVа), или наблюдаются хаотические скачки мутности, приводящие к формированию сложных петель (тип IVб) [1]. В северных районах Сибири и Дальнего Востока формирование таких петель – результат дифференцированной во времени активизации склоновых процессов на берегах рек (оползни, обрушение термоэрозионных карнизов, солифлюкция) на разных удалениях от заданного створа, обеспечивающих импульсное поступление в поток большого количества материала [23–24].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выявления эффекта гистерезиса и его географического анализа использовались данные об измеренных расходах воды и средней мутности потока по 27 гидрологическим постам (г/п) на 16 крупных и средних реках севера Сибири и Дальнего Востока. Использованные материалы публиковались в изданиях Государственного водного кадастра (ГВК) с 1956 по 1985 г. Количество лет наблюдений и число измерений мутности сильно различаются по исследованным объектам: наименьшее число измерений (40–60 за 3–7 лет) имеется для бассейна р. Колымы, наибольшее (150–219 за 12–17 лет) – для бассейна р. Индигирки. По набору исходных данных построено более 200 хронологических графиков связи расхода и мутности воды, сгруппированных по фазам водного режима. На основании многих графиков сложно сделать вывод о типе связи, временном соотношении между пиками расхода воды и наносов, что связано с неполнотой исходных данных. Большая временная дискретность данных наблюдений не дает возможности анализировать высокочастотные (в пределах нескольких суток) колебания мутности, однако полученные данные позволяют выявить самые общие закономерности хронологических изменений стока наносов (таблица).

## ЭФФЕКТ ГИСТЕРЕЗИСА В ПЕРИОД ПОВОДОДЬЯ

В период половодья для большинства исследованных рек характерно постепенное увеличение мутности при возрастании расхода воды (различные типы положительной кривой гистерезиса на рис. 3). В связи с практически повсеместным промерзанием водосборов исследуемых рек содержание наносов во взвеси формируется в основном из запасов руслового аллювия. Максимальная мутность при этом наблюдается в среднем на 3–5 дней раньше максимального расхода воды, поскольку волна мутности движется быстрее волны максимальных расходов. После прохождения пика мутность снижается, интенсивность снижения варьирует от поста к посту, от года к году и зависит от ряда факторов, в том числе от продолжительности половодья и температуры воздуха в период снеготаяния, крупности руслообразующих наносов (тип IIIа на рис. 3а).

Графики хода мутности в этом случае лишь изредка повторяют форму гидрографа, максимум мутности при этом несколько опережает максимум расхода. Такие условия прохождения половодий наблюдаются периодически в среднем течении Северной Сосьвы, низовьях Алдана и верховьях Колымы (р. Аян-Юрях). Этот тип связи может формироваться (как и тип IIIв) в результа-

Преобладающие типы связи между расходом и мутностью воды в выбранных створах (прочерк – отсутствие данных)

Река	Пост	Преобладающий тип связи	
		в половодье	в паводки
Бассейн Карского моря			
Северная Сосьва	Сосьвинская культбаза	IIIa–IIIб	IIIa–IIIд
Пур	Самбург	IIIг	IIIг
Бассейн моря Лаптевых к западу от устья Лены			
Анабар	Саскылах	–	IIIe–IVб
Оленёк	Сухана	IIIв–IIIб	IIIв–IIIe
	7.5 км выше устья р. Буур	IIIв–IVб	IIIг–IVб
Бассейн р. Лены			
Лена	Табага	IIIб–IIIв	IIIб–IIIв
	Кюсюр	IVб–IIIe	–
Алдан	Охотский перевоз	IIIa–IIIб	IIIe–IVб
	Верхоянский перевоз	IIIб	IIIб–IVб
Виллой	Сунтар	IIIг–IIIa	IVб
	Хатырык-Хомо	IIIг–IIIб	–
Бассейн моря Лаптевых к востоку от устья Лены			
Яна	Верхоянск	IIIв–IVб	IIIб–IIIв
	Джангкы	IIIe–IVб	IVб
Адыча	Ойюн-Хомото	IIIe–IVб	IIIб–IVб
Бассейн Восточно-Сибирского моря			
Индигирка	Юрты	IIIв–IIIд	IIIб–IVб
	Индигирский	IIIб–IIIд	IIIб–IVб
	Воронцово	IIIв–IIIд	IIIe–IIIв
Нера	Ала-Чубук	IIIб–IIIe	IIIe–IVб
Колыма	Дусканья	IIIв	IIIв
	Синегорье	IIIв	IIIв–IVб
	Усть-Среднекан	IIIв	IVб
	Среднеколымск	IIIв–IVб	IIIe–IVб
Аян-Юрях	Эмтегей	IIIa–IIIг	IIIв–IVб
Омолон	Лабазная	IIIв	IIIв–IVб
Олой	Уточан	IIIв	IVб
Бассейн Тихого океана			
Анадырь	Новый Еропол	IIIб–IIIa	IVб
	Совхоз “Снежное”	IIIб	IIIe

те суперпозиции отдельных волн добегания с притоков или участков, связанных с различными источниками наносов.

На верхней Индигирке и Анадыре, реках Западной Сибири, средней Лене и нижнем Алдане пики  $s$  и  $Q$  проходят через створ гидрологического поста синхронно (тип IIIб на рис. 3б), что может говорить о незначительной удаленности источников поступления наносов в поток от гидростворов. Интенсивность изменений мутности несколько выше, чем интенсивность роста и падения расхода.

При этом превышение ветви подъема кривой над ветвью спада невелико. Поскольку мутность начинает резко расти лишь после превышения некоторых значений расхода воды, можно говорить о связи роста мутности с размывом некоторых затопляемых поверхностей (берегов, отмелей), повышенной крупностью размываемых русловых отложений. Следует отметить, что этот тип гистерезисной кривой характерен для участков рек со значительной (>30%) долей влекомых наносов в суммарном стоке и большей площадью поверх-

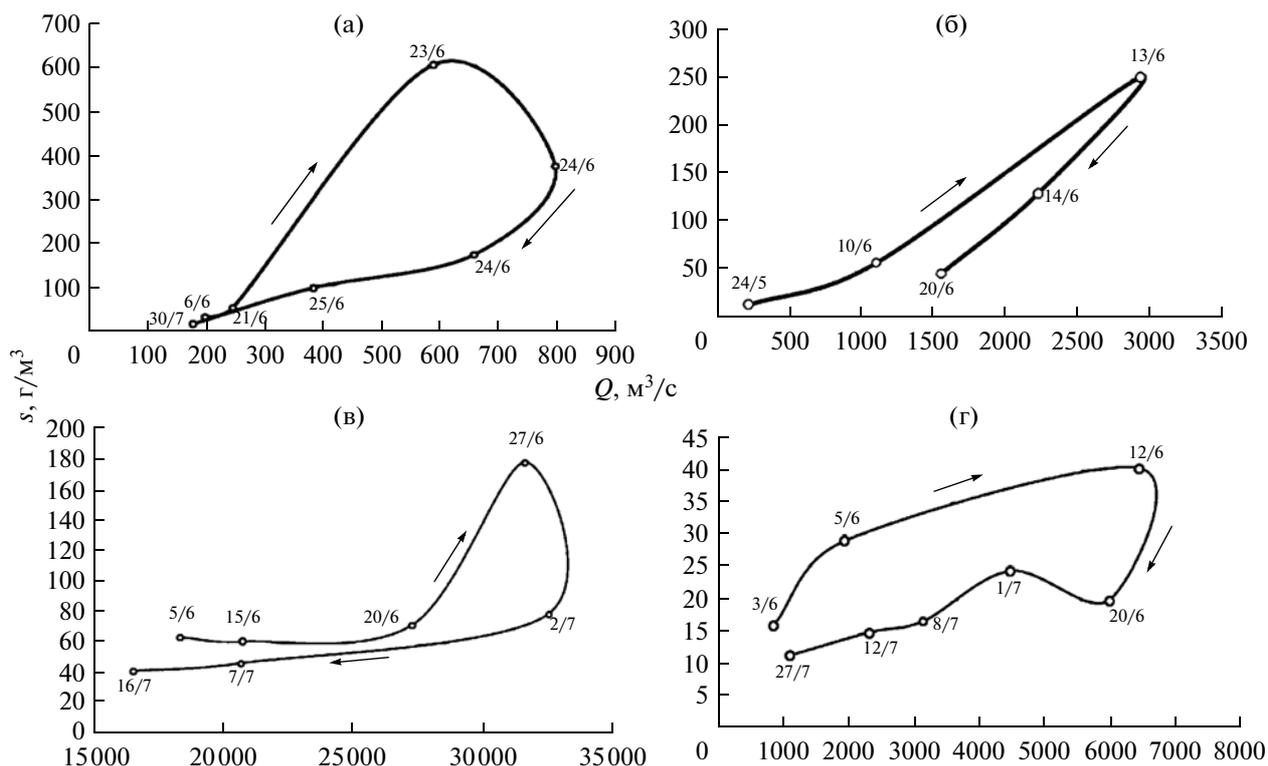


Рис. 3. Основные типы положительных кривых гистерезиса на реках севера Сибири и Дальнего Востока (здесь и на рис. 4 шкалы рисунков не совпадают по масштабу и граничным величинам): а – р. Аян-Юрях–пос. Эмтегей, 1972 г.; б – р. Индигирка–пос. Индигирский, 1960 г.; в – р. Лена–пос. Табага, 1964 г.; г – р. Пур–г. Самбург, 1959 г.

ности аллювиальных массивов (осерёдков, побочней).

Гистерезисные кривые типа Шв, наблюдаемые на большинстве рек региона, сходны с кривыми типа Ша, однако для них характерны гораздо более резкие колебания мутности в течение половодья с пиком, значительно опережающим максимум расходов воды (рис. 3в). Относительное положение пиков свидетельствует скорее об импульсном, кратковременном поступлении в поток некоторого ограниченного объема наносов. Анализ опубликованных материалов позволяет предположить, что мутность на подъеме половодья формируется из материала, отложенного в русле в период осеннего падения расходов, – мелкозернистого, хорошо сортированного и наиболее доступного для эрозии [17]. По мере прохождения волны половодья потоком начинают взмучиваться частицы более крупного и трудноразмываемого руслообразующего аллювия, что может значительно понизить мутность потока.

Данные, приведенные в [14, 22], подтверждаются анализом гранулометрического состава и крупности взвешенных наносов в створах исследованных рек. Так, на спаде половодья в 1960 г. на р. Адыче (с. Ойун-Хомото) средний диаметр взвешенных наносов увеличился с 0.13 до 0.24 мм,

при этом доля частиц диаметром  $>0.05$  мм выросла с 26.3 до 38.7%. Начало спада половодья в 1962 г. на р. Индигирке (г/п Воронцово) привело к резкому росту содержания в потоке частиц диаметром 0.1–0.2 мм (с 0.5 до 27.7%), при этом доля частиц диаметром  $>0.05$  мм выросла с 30.1 до 55.3%. Ограничению поступления руслообразующего аллювия в поток способствует широкое распространение в руслах северных рек армирующей сезонномёрзлой толщи, образующейся при промерзании и перемерзании рек [2, 10].

Волна мутности, растянутая во времени, выражается на  $s(Q)$ -кривой гистерезиса типа Шг (рис. 3г), при этом она может быть синхронной с волной половодья или несколько опережать ее. Такой тип связи характерен для р. Пур и протяженного участка р. Вилюй ниже каскада Вилюйских ГЭС, характеризующихся растянутым во времени половодьем (на Вилюе – сезонными пусками в летний период) и небольшими абсолютными величинами мутности. Формирование этого типа связи лучше всего объясняет разбавление речных вод подземным стоком, чему способствует большая продолжительность половодья и наличие постоянной положительной гидравлической связи между руслом и грунтовыми водами на его спаде. Определенный вклад вносит также низкая интенсивность эрозионных процессов в

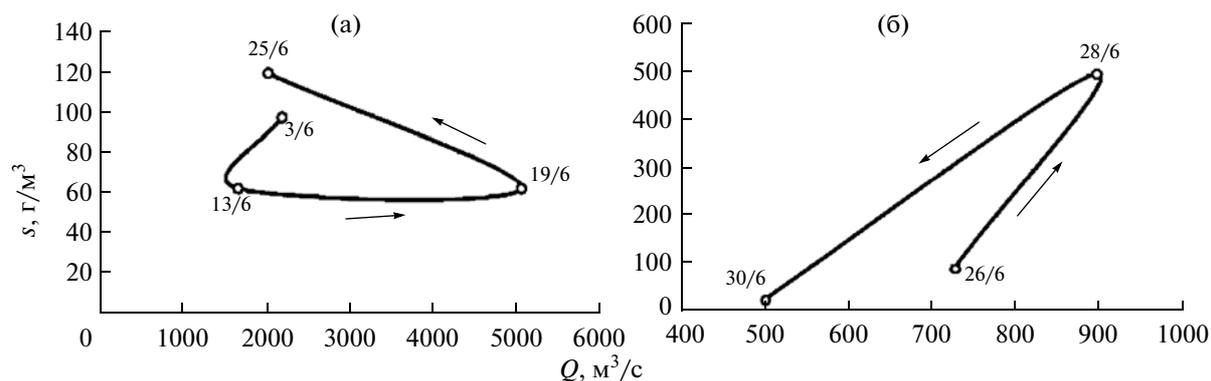


Рис. 4. Основные типы отрицательных кривых гистерезиса на реках севера Сибири и Дальнего Востока: а – р. Яна–пос. Джангкы, 1973 г.; б – р. Нера–пос. Ала-Чубук, 1967 г.

заболоченных тундрах бассейна Пура и наличие обширных промерзающих в зимнее время аллювиальных массивов нижнего Вилюя.

Половодья, для которых  $s(Q)$ -кривая отрицательная (тип IIIд–IIIе на рис. 4а, 4б), наблюдаются не каждый год, чаще – на реках северо-востока России, протекающих в наиболее суровых климатических и геокриологических условиях и в горном окружении (Яна и Индигирка с притоками). В связи со значительными уклонами водосборов в этих условиях возрастает роль склоновых и других гравитационных процессов массопереноса, которые активизируются по мере нарастания мощности сезонного слоя. Условия для развития процессов массопереноса именно на спаде половодья складываются не каждый год, поэтому отрицательные кривые гистерезиса наблюдаются лишь в отдельные годы.

Оба типа отрицательных гистерезисных кривых соотношений  $s$  и  $Q$  вызываются сходными причинами, которые являются наиболее значимыми для запаздывания пика мутности относительно максимума расхода. Отсутствие поступления руслообразующей фракции аллювия в период подъема половодья объясняется спецификой сезонного промерзания русловых отложений. В зимний период в днищах долин формируется мощный подрусловой поток, являющийся источником влаги, подтягиваемой к фронту промерзания снизу при формировании сезонномерзлого слоя. Мелкодисперсный русловой аллювий Яны, Адычи и низовьев Индигирки, промерзая в условиях практически неограниченного притока влаги снизу, формирует в толщах аллювиальных массивов высокольдистые мерзлые линзы [5]. Взаимодействие с ними охлажденного потока половодья практически не приводит к их размыву и отрыву частиц [3]. Другой механизм действует в галечно-валунных руслах верхней части бассейна Индигирки, где вследствие особенностей теплообмена потока и днища долины мерзлые грунты отсут-

ствуют [9]. Здесь прохождение многочисленных осенних дождевых паводков формирует слой аллювиальной отмостки, которую волна половодья, зачастую имеющая водность меньше, чем водность паводков, практически не размывает.

Формирование ветви спада на кривой гистерезиса происходит в условиях активизации эрозии на водосборе (в меньшей степени), при оттаивании и размыве аллювиальных поверхностей, а также при активном размыве берегов в форме термоэрозионных ниш, отседании по полигональным и повторно-жильным льдам, а после постепенного протаивания – и вязкопластичном течении грунта.

Наличие в верховьях реки либо в створе поста нескольких источников наносов, доставка которых в поток происходит асинхронно и зачастую независимо от водного режима, приводит к формированию сложных петель в форме “восьмерки” или других комбинаций ветвей подъема и спада (тип IVб на рис. 5). В условиях криолитозоны через заданный створ могут последовательно проходить мобилизованные руслообразующие наносы, волны мутности притоков, асинхронные относительно основной реки, продукты размыва берегов и склоновой эрозии с верхних частей водосбора, формируя довольно сложные взаимосвязи.

#### ЭФФЕКТ ГИСТЕРЕЗИСА В ПАВОДОЧНЫЙ ПЕРИОД

Четко выраженный паводочный период характерен для всех рек севера Сибири и Дальнего Востока. На реках с восточно-сибирским водным режимом за летне-осенний паводочный сезон через заданный створ проходит 2–3 дождевых паводка, весьма растянутых во времени в случае большой площади водосбора. На реках с дальневосточным типом водного режима наблюдается 4–6, иногда 8–10 паводочных событий. По вод-

ности отдельные паводки часто могут превышать предшествующие половодья. В зависимости от типа водного режима и природного окружения в течение паводочного периода на исследуемых реках формируются соотношения между расходом и мутностью, соответствующие кривым гистерезиса типа III или IV. Это зависит от продолжительности паводочного события, его места в серии паводков и времени, прошедшего после предыдущего события, а также от преобладающего источника поступления наносов в русло.

Положительные кривые гистерезиса (тип IIIa–IIIг) наблюдаются в двух разнородных физико-географических районах – в западной части севера Сибири и на некоторых реках Верхояно-Колымской горной страны. Пологие и растянутые во времени паводки западно-сибирских рек, зарегулированные естественной заозеренностью территории, приводят к истощению русловых запасов наносов до прохождения максимума расходов. Этому способствует оторфованность береговых склонов, размыв которых затруднителен, низкая активность основных эрозионных процессов, поставляющих наносы в русло, и низкий коэффициент доставки. В горных районах Верхояня основные факторы, приводящие к преобладанию в паводочный период положительного гистерезиса, – повышенная доля дождевого и наледного стока, а также связанный с этим эффект разбавления [31]. Последний фактор особенно заметно проявляется при прохождении нескольких последовательных дождевых паводков, приводящих к влагонасыщению поверхности водосбора и появлению поверхностного (“хортоновского”) стока. Кроме того, склоновые процессы здесь выносят в днища долин в основном крупный материал, который переносится реками влечением и лишь по мере истирания начинает формировать мутность потока.

Отрицательные кривые гистерезиса (тип IIIд–IIIе) в паводочный период наблюдаются в основном на участках рек, расположенных ниже перехода потока из горных районов в полугорные или равнинные. Эффект гистерезиса в данном случае связан, вероятно, с замедленным формированием потока наносов и его доставкой по склонам относительно формирования стока воды в горных районах водосбора. В результате, даже с учетом более быстрого добега волн мутности, воды дождевого паводка пересекают створ раньше, чем сформированный этим паводком сток наносов, формируя обратную петлю. Кроме того, в условиях динамической перестройки русла, связанной с изменением условий руслоформирования, возрастает роль береговых процессов (обрушение и размыв блоков отседания, солифлюкция и крип), активизирующихся на спаде паводков.

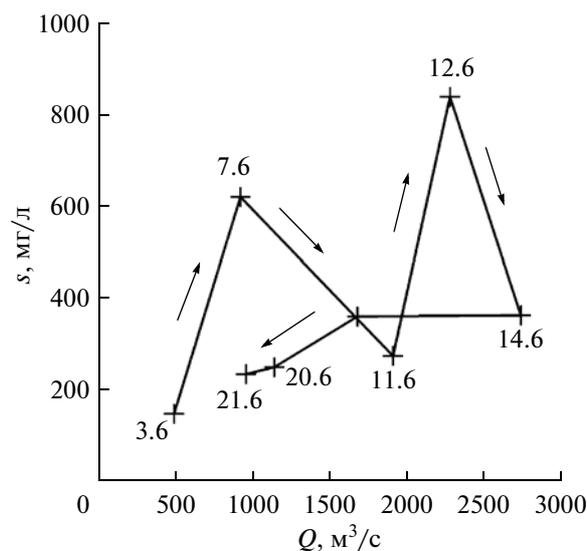


Рис. 5. Основной тип смешанной кривой гистерезиса на реках севера Сибири и Дальнего Востока: р. Яна–г. Верхоянск, 1967 г.

Хаотические (не имеющие стохастической природы) связи типа IVб наблюдаются на реках криолитозоны в паводки заметно чаще, чем в половодья. Многофакторность процесса формирования стока наносов и перемещения материала по русловой сети в данном случае не позволяет детально охарактеризовать роль каждого индивидуального процесса в суммарном потоке вещества. В балансе наносов, складывающемся на каждом отдельном участке русла, преобладающую роль могут играть различные факторы и процессы: увеличение транспортирующей способности вследствие таяния снежников и наледей, значительная меридиональная протяженность водосборов, асинхронность перемещения волн паводков по реке и ее притокам, активность склоновых процессов, размыв оттаявшего руслового аллювия, – которые вносят определенный вклад в изменение мутности потока.

## ВЫВОДЫ

Для всех исследованных рек севера Сибири и Дальнего Востока характерно наличие эффекта гистерезиса, т.е. неоднозначности в соотношении расхода и мутности воды в различные фазы водного режима. Основные факторы формирования нелинейности в соотношении расхода и мутности воды – различия в источниках питания рек, скорости добега волн расходов и мутности с притоков, а также неодновременность протекания отдельных эрозионных процессов. Вызывающие этот эффект причины связаны с гидрологическим режимом, мерзлотными условиями, особен-

ностями протекания эрозионных процессов на водосборах и в долинах рек криолитозоны.

В половодье на реках исследуемого региона преобладают положительные гистерезисные кривые, что связано с более ранним прохождением волны мутности относительно пика расхода, с разбавлением вод половодья базовым стоком, со взмучиванием материала, отложенного в пределах русла в предыдущие периоды. Повсеместное распространение мерзлоты в русле иммобилизует поверхности крупных русловых аллювиальных форм, в результате чего в период прохождения половодья доступны для размыва преимущественно наносы, аккумулярованные в наиболее глубоких частях русла. Отрицательный гистерезис наблюдается на реках Верхояно-Колымской горной страны в связи не только с повышенной мутностью ветви спада, связанной с развитием береговых процессов, но и с крайне низкими значениями мутности на подъеме половодья, когда источники наносов практически отсутствуют как на водосборе, так и в русле.

В паводочный период тип кривой определяется преобладающим процессом доставки наносов потоком к заданному створу. Разбавление вод паводка грунтовыми водами, ограниченность русловых запасов наносов приводят к образованию положительных типов связи, в то время как замедленное добегание наносов с водосбора, динамическая перестройка русел и активные береговые процессы – предпосылка к формированию отрицательных типов связи. Как в половодья, так и в паводки для рек характерны сложные типы гистерезисных петель, что связано с асинхронностью воздействия притоков на гидрологический режим, с чередованием нескольких источников поступления наносов в русло.

Полученные данные позволили в первом приближении оценить роль соотношения взвешенных и влекомых наносов в формировании кривых гистерезиса. Так, в период половодья для участков рек со значительной (>30%) долей влекомых наносов в суммарном стоке характерен определенный тип гистерезисной кривой (тип IIIб).

С учетом специфики природных условий для периода половодья предварительно установлена связь между типом гистерезиса и преобладающим источником наносов, что позволяет точнее оценивать вклад отдельных составляющих суммарного потока наносов на водосборе. Для исследованных рек возможно использование гистерезисных кривых для уточнения расчетов суммарного годового стока наносов с использованием различных уравнений для ветвей падения и спада.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. М.: МГУ, 1998. 202 с.
2. *Аржакова С.К.* Зимний сток рек криолитозоны России. СПб.: РГГМУ, 2001. 209 с.
3. Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995. 600 с.
4. *Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных долин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.
5. *Гречищев С.Е.* Межфазное взаимодействие в поровой влаге и терморелегическая модель мерзлых грунтов // Инженерная геология. 1979. № 4. С. 72–85.
6. *Караушев А.В.* Проблемы динамики естественных водных потоков. Л.: Гидрометеоздат, 1960. 392 с.
7. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
8. *Маккавеев Н.И., Чалов Р.С.* Русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1986. 264 с.
9. *Михайлов В.М.* Пойменно-фильтрационные талики Северо-Востока России. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2005. 42 с.
10. *Тананаев Н.И.* Сток наносов и русловые процессы на реках криолитозоны. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2007. 26 с.
11. *Толстов А.Н.* Некоторые данные о разрушении берегов в нижнем течении р. Индигирки // Вопр. географии Якутии. Вып. 2. Якутск: Якутское кн. изд-во, 1962. С. 123–128.
12. *Хмызников П.К.* Гидрология бассейна реки Яны // Совет по изучению природных ресурсов (СОПС). АН СССР – Гидрографическое управление Главного управления Северного морского пути при Совете народных комиссаров СССР. Сер. Якутская. Вып. 19. Л.: Изд-во АН СССР, 1934. 252 с.
13. *Шур Ю.Л., Петрухин Н.П., Славин-Боровский В.Б.* Разрушение берегов в криолитозоне // Криогенные процессы. М.: Наука, 1978. С. 57–73.
14. *Arnborg L., Walker H.J., Peippo J.* Suspended load in the Colville River, Alaska, 1962 // Geografiska Annaler. Series A. 1967. V. 49. № 2/4. P. 131–144.
15. *Asselman N.E.M.* Suspended sediment dynamics in a large basin: the river Rhine // Hydrological Proc. 1999. V. 13. P. 1437–1450.
16. *Vača P.* Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybárik basin, Slovakia // Hydrological Sci. J. 2008. V. 53. Is. 1. P. 224–235.
17. *Bogen J.* The hysteresis effect of sediment transport systems // Norwegian J. Geography. 1980. V. 34. Is. 1. P. 45–54.
18. *De Sutter R., Verhoeven R., Krein A.* Simulation of sediment transport during flood events: laboratory work and field experiments // Hydrological Sci. J. 2001. V. 46. № 4. P. 599–610.
19. *Diez J.C., Alvera B., Puigdefabregas J., Gallard F.* Assessing sediment sources in a small drainage basin above the timberline in the Pyrenees // Sediment budgets. Proc. Porto Allegre Symposium. 1988. IAHS Publication № 174. P. 197–205.

20. *Ferguson R.I.* River loads underestimated by rating curves // *Water Resources Research*. 1986. V. 22. № 1. P. 74–76.
21. *Hjulström F.* Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris // *Bulletin of Geology Institute of Uppsala*. V. 25. 1935. P. 221–527.
22. *Kleinhans M.G., Wilbers A.W.E., ten Brinke W.B.M.* Opposite hysteresis of sand and gravel transport upstream and downstream of a bifurcation during a flood in the river Rhine, the Netherlands // *Netherlands J. Geosciences*. 2007. V. 86. № 3. P. 273–285.
23. *Lewis T., Braun C., Hardy D.R. et al* An extreme sediment transfer event in a Canadian High Arctic stream // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2005. V. 37. № 4. P. 477–482.
24. *Lewkowicz A., Hartshorn J.* Terrestrial record of rapid mass movements in the Sawtooth Range, Ellesmere Island, North-West Territories, Canada // *Canadian J. Earth Sciences*. 1998. V. 35. P. 55–64.
25. *Rodriguez-Blanco M.L., Taboada-Castro M.M., Taboada-Castro M.T.* Sources and sediment yield from a rural catchment in humid temperate environment, north-west Spain // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2010. V. 35. Is. 3. P. 272–277.
26. *Slattery M.C., Gares P.A., Philips J.D.* Slope-channel linkage and sediment delivery on North Carolina Coastal Plain cropland // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2002. V. 27. P. 1377–1387.
27. *Slaymaker O.* Mountain geomorphology: a theoretical framework for measurement programmes // *Catena*. 1991. V. 18. P. 427–437.
28. *Syvitski J.P.M., Alcott J.M.* RIVER3 – Simulation of river discharge and sediment transport // *Computers & Geosciences*. 1995. V. 21. № 1. P. 89–151.
29. *Syvitski J.P.M., Morehead M.D., Bahr D.B., Mulder T.* Estimating fluvial sediment transport: the rating parameters // *Water Resources Research*. 2000. V. 36. № 9. P. 2747–2760.
30. *Walling D.E.* Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin // *Water Resources Research*. 1977. V. 13. № 3. P. 531–538.
31. *Walling D.E., Webb B.W.* Sediment availability and the prediction of storm-period sediment yield // *Recent developments in the explanation and prediction of erosion and sediment yield (Proc. Exeter Sympos., July 1982)*. IAHS Publication № 137. P. 327–337.
32. *Williams G.P.* Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers // *J. Hydrology*. 1989. № 111. P. 89–106.
33. *Wolman M.G., Miller J.P.* Magnitude and frequency of geomorphic processes // *J. Geology*. 1960. V. 68. P. 57–74.