

## ЧЁТКООБРАЗНЫЕ РУСЛОВЫЕ ФОРМЫ В ДОЛИНАХ МАЛЫХ РЕК НА ЦЕНТРАЛЬНОМ ЯМАЛЕ – РЕЗУЛЬТАТ ПАРАГЕНЕЗА КРИОГЕННЫХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.А. Губарьков, М.О. Лейбман\*

Тюменский государственный нефтегазовый университет,  
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия, agubarkov@gmail.com

\* Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия, mleibman@online.ru

Чёткообразные русловые формы являются результатом взаимодействия комплекса гидрологических и криогенных процессов, ведущим из которых является термокарст. Криогенные и гидрологические процессы (термокарст, криогенное оползание, русловые процессы, термоэрозия, сток воды и наносов) исследованы в долине малой реки Панзананаяха на полигоне “Васькины Дачи” на Центральном Ямале. Река Панзананаяха репрезентативна для малых рек Ямала. Определено общее количество, длина, ширина и глубина чёткообразных русловых форм на всем протяжении реки, а также на отдельных участках русла для выявления роли термокарста в комплексах русловых и криогенных процессов и его соотношения с другими процессами. Оценено также влияние криогенного оползания и термоэрозии на склонах долины на термокарст в русле реки. Установлены факторы, определяющие параметры чёткообразных русловых форм в верхнем, среднем и нижнем течениях реки Панзананаяха.

*Гидрологические процессы, криогенные процессы, чёткообразные русловые формы, термоэрозия, термокарст, криогенное оползание, малая река*

### BEAD-SHAPED CHANNEL FORMS AS EVIDENCE OF PARAGENESIS OF CRYOGENIC AND HYDROLOGICAL PROCESSES IN THE SMALL-RIVER VALLEYS OF CENTRAL YAMAL

A.A. Gubar'kov, M.O. Leibman\*

Tyumen State Oil and Gas University, 625000, Tyumen, Volodarskiy str., 38, Russia, agubarkov@gmail.com

\* Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, Malygin str., 86, Russia, mleibman@online.ru

Bead-shaped channel forms result from interrelation of hydrological and cryogenic processes under the leading role of thermokarst. Cryogenic and hydrological processes (thermokarst, cryogenic landsliding, thermal erosion) were studied in the small river Panzanana-Yakha valley at the research polygon “Vaskiny Dachi” at Central Yamal. This river represents small rivers of Yamal. The quantity, length, width and depth of bead-shaped channel forms were determined both for the entire river channel, and for the specific parts of the channel. The impact of the complex of cryogenic processes in the valley on thermokarst in the channel was also estimated. The factors responsible for the parameters of the bead-shaped forms in the upper-, middle- and low stream of Panzanana-Yakha river were established.

*Hydrological processes, cryogenic processes, bead-shaped channel forms, thermal erosion, thermokarst, cryogenic landsliding, small river*

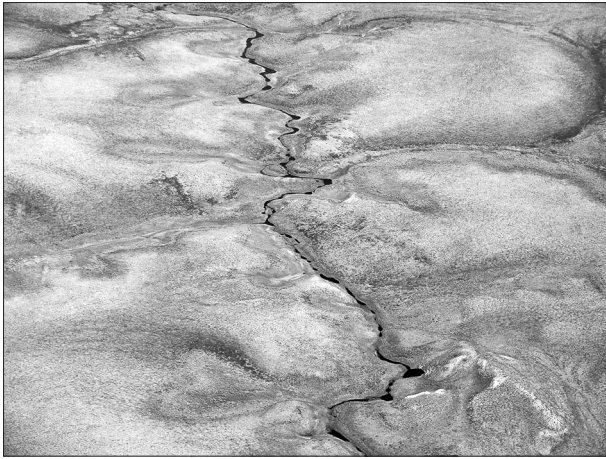
## ВВЕДЕНИЕ

Русловые формы – это результат взаимодействия русла и потока, определяющие тип руслового процесса. “Весь комплекс явлений как первоначального формирования русловых форм, так и дальнейших их изменений носит название руслового процесса” [Великанов, 1955, с. 237].

В геоморфологической, гидрологической и геоэкологической литературе встречаются термины чёткообразная, чёточная или чётковидная формы, которые характеризуют плановые очертания русел, берегов, долин рек, озер, образующих в плане сопряженное чередование расширенных и суженных участков (рис. 1). Применяются также термины “чёткообразные долины рек” [Соколов,

1952], “чёткообразный дренаж” [Вейсман, 1978], “чётковидные русла” [Колобовский, 2006]. Термин “чёткообразный дренаж” отражает процесс стока или сброса воды, но не указывает явно на взаимодействие потока и русла или на процесс формирования русловой формы.

На севере Западной Сибири чёткообразные русловые формы (ЧРФ) являются результатом взаимодействия комплекса гидрологических и криогенных процессов, ведущим из которых является термокарст, увеличивающий ширину и глубину русла в зависимости от мощности полигонально-жильных льдов (ПЖЛ). Расстояние между ЧРФ определяется размерами полигонов, по кото-



**Рис. 1. Чёткообразные русловые формы на Центральном Ямале.**

рым протекает река. Из криогенных процессов на Центральном Ямале наиболее широко распространены термоэрозия, термокарст, криогенное оползание, морозобойное растрескивание и жильное льдообразование. Известно, что достаточно часто эти процессы взаимосвязаны. Согласно классификации термокарстовых образований, развитых на севере Западной Сибири [Геокриология СССР, 1989], все термокарстово-эрозионные формы развиваются по повторно-жильным и сегрегационным льдам. Широко известны чёткообразные колленчатые русла, формирующиеся на участках пересечения близко залегающих повторно-жильных льдов [Дроздов, 2004; Хименков, Брушков, 2006; Реве, 1954; Hopkins, Karlstrom, 1955; Ferrains et al., 1969; Brown, 1970; Lawson, Brown, 1978; Van Eeverdingen, 1998]. Однако слабо изучено влияние на сток воды в руслах подпорных явлений, которые на водотоках Центрального Ямала связаны с криогенным оползанием. Влияние криогенного оползания на русловый термокарст заключается в формировании своеобразных “дамб”, сложенных телами криогенных оползней и подпорных озёр выше по течению. Явления подпора воды телами криогенных оползней скольжения рассматриваются как основной сдерживающий фактор образования и развития ЧРФ в узких долинах верховьев малых рек. Таким образом, в условиях ограниченной водности в верхнем течении возникновение и развитие ЧРФ здесь полностью зависит от активности криогенного оползания.

К рассматриваемым гидрологическим процессам относятся русловые деформации как неотъемлемая составная часть русловых процессов. Под русловыми деформациями понимается изменение размеров и положения в пространстве речного русла и отдельных русловых образований, связанное

с переотложением наносов [Работа..., 1987; Чалов, 2008]. Плановые деформации представляют собой результат намыва и размыва берегов русла.

Русловые процессы на Центральном Ямале и в целом на севере Западной Сибири изучены на ряде крупных и средних рек. Имеется 20-летний ряд наблюдений на реках Пур, Полуй, Надым, Таз [Барышников, Попов, 1988; Барышников, Самусева, 1992]. Проведены наблюдения на р. Юрибей [Арз, Ярков, 1990]. По аэрофотоматериалам определены русловые деформации на р. Сеяха [Юрьев, 2009]. Эти исследования свидетельствуют о различных скоростях деформации берегов, которые определяются наряду с гидрологическими и геологическими факторами геокриологическими условиями территории. Следует отметить, что под руслами рек образуются сквозные и несквозные подрусовые талики, в которых происходит полное вытаивание внутригрунтовых льдов [Геокриология СССР, 1989]. Однако о значении термокарста в формировании русел рек в данных работах не сказано. Это связано с тем, что на средних и крупных реках влияние термокарста не проявляется в русловых формах, так как при значительной водности и активном транспорте наносов гидрологические процессы доминируют.

ЧРФ в руслах малых постоянных водотоков описаны в лесотундре севера Западной Сибири [Вейсман, 1978]. Но степень проявления ЧРФ в таких геокриологических условиях крайне низка, поскольку ограничено распространение современного жильного льдообразования, поэтому детально они не рассматриваются. Л.И. Вейсман [1978] описывает данное явление как чёткообразный дренаж, используя этот термин как прямой перевод с английского.

В зарубежной литературе описывается чёткообразный дренаж (beaded drainage) как серия или цепочка небольших водоемов, соединенных короткими протоками [Hopkins, Karlstrom, 1955]. Водоемы образуются в результате протаивания ледяных тел, часто в узлах решетки ПЖЛ. Соединяющие их водотоки, как правило, закладываются по направлению ледяных жил и поэтому обычно состоят из коротких прямых участков, сходящихся под углом. Глубина водоемов составляет от 1 до 3 м, размер в поперечнике до 30 м. Чётковидные системы стока были описаны на севере Аляски [Уошборн, 1988]. Их зарождение и развитие в ряде мест было спровоцировано антропогенным нарушением тундровой растительности [Lawson, Brown, 1978].

Малые реки являются основой гидрографической сети [Калинин и др., 1998]. Этим определяется важность рассмотрения вопроса о формировании русла, поскольку термокарстовые образования во взаимодействии с другими процессами регулируют речной сток и сток наносов. В тундро-

вой зоне, в частности на Ямале, малые реки практически не изучались. Исследования малых рек в Западной Сибири проведены только на юге Тюменской области [Калинин и др., 1998], где выявлена большая антропогенная зарегулированность стока воды, с чем связаны русловые деформации при аварийных ситуациях на плотинах. Вместе с тем для тундровой зоны Западной Сибири характерно широкое распространение эрозионно-термокарстовых образований именно в долинах малых рек, например на Бованенковском месторождении [Романенко, 1997].

Соотношение гидрологических и криогенных факторов на каждом из участков реки создает своеобразный комплекс склоновых, термокарстовых, термоэрозионных и русловых процессов, которые обуславливают распределение и гидрометеорологические особенности ЧРФ. В данной статье анализируются изученные в долине модельной реки Панзананаяха ЧРФ как проявления руслового термокарста во взаимодействии с дру-

гими гидрологическими и криогенными процессами, распространенными в рассматриваемой долине малой реки, а именно: с подавлением термокарста криогенным оползанием в верхнем течении, доминированием термокарста над всеми другими криогенными и гидрологическими процессами в среднем течении и переходом к постепенному преобладанию термоэрозии в нижнем течении реки.

### РАЙОН РАБОТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЧРФ исследованы на полигоне “Васькины Дачи”, где проведены многолетние геокриологические, геоморфологические и ландшафтные наблюдения [Лейбман, Кизяков, 2007]. Полигон расположен на междуречье рек Сеяха и Мордыяха, в которые впадают все малые реки района. Модельная река Панзананаяха с площадью водосбора 8 км<sup>2</sup> (рис. 2) является правым притоком р. Мор-

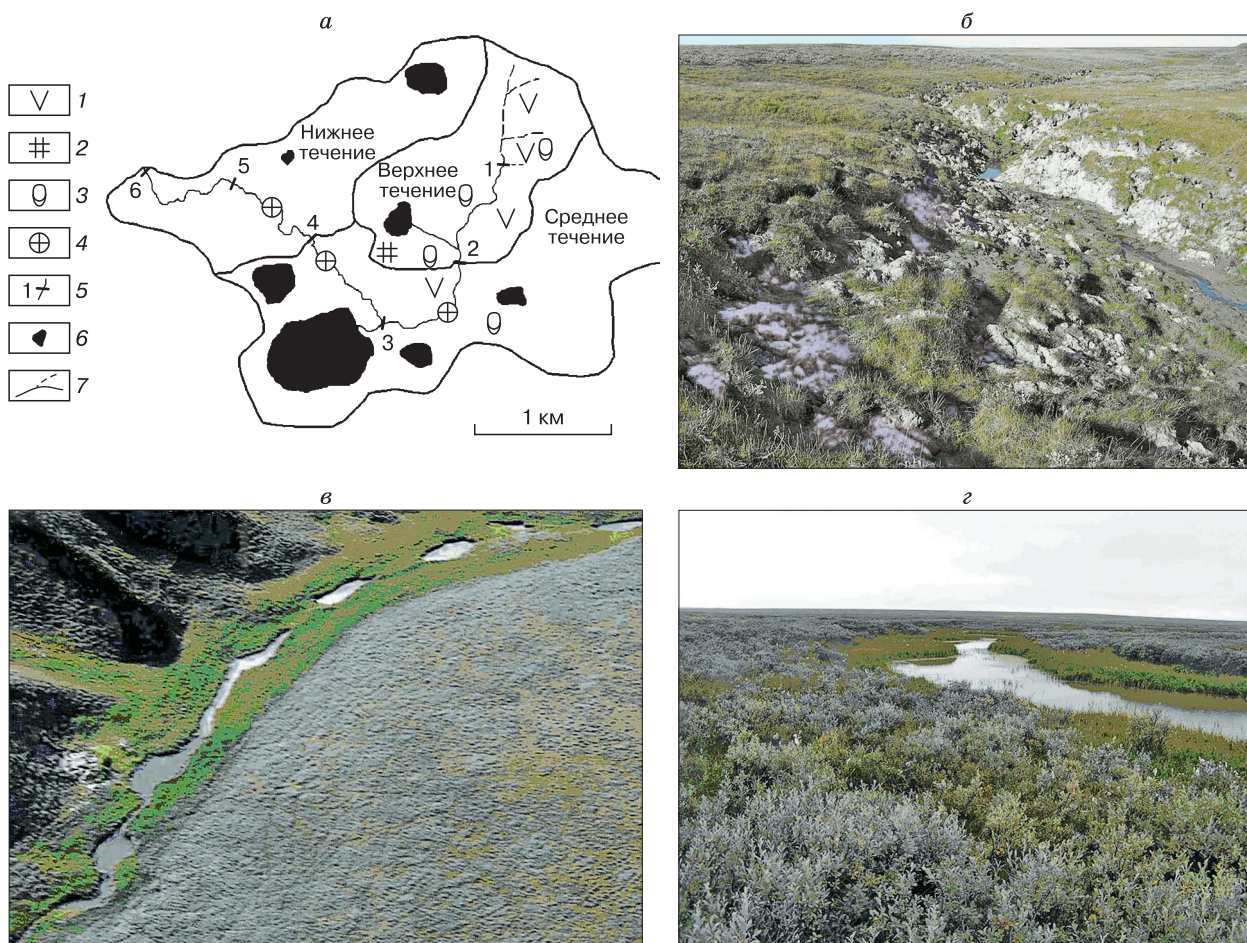


Рис. 2. Бассейн р. Панзананаяха.

а – схема бассейна; 1 – термоэрозия; 2 – полигональные формы рельефа; 3 – криогенные оползни; 4 – чёткообразные русловые формы; 5 – номера гидростворов (см. табл. 2); 6 – озера; 7 – постоянные и временные водотоки. Участки течения р. Панзананаяха: б – верхнее, в – среднее, г – нижнее.

дыха. В целом сопоставление притоков рек Сеяха и Мордыха показывает, что р. Панзананаяха репрезентативна для малых рек района, так как ее длина (6 км) практически равна среднему значению из длин всех малых рек полигона (5,99 км). Основные объекты исследования – это комплекс русловых процессов (донная и береговая термоэрозия и эрозия), криогенных склоновых процессов (криогенное оползание и овражная термоэрозия) и руслового термокарста, которые обуславливают гидроморфометрические параметры и особенности пространственного распределения ЧРФ.

Основными методами исследования являлись наземные стационарные и маршрутные наблюдения и измерения ЧРФ на р. Панзананаяха. На створах (см. рис. 2, а) велись промерные работы русла реки и измерения криогенных образований в долине реки, измерялись гидрометрические характеристики: ширина, глубина и скорость потока. По всей протяженности р. Панзананаяха измерены длина, ширина и глубина всех термокарстовых просадок в русле. Аэровизуальные и маршрутные исследования, а также анализ картографического материала использовались для оценки распространенности изучаемых процессов, для выделения участков русла с определенными свойствами и соотношением гидрологических и криогенных факторов. Проведен общий анализ ЧРФ от истока до устья. Отдельно рассмотрены верхнее, среднее и нижнее течения р. Панзананаяха, различающиеся комплексом криогенных процессов, влияющих на проявления термокарста в русле и связанные с ним ЧРФ.

В долине р. Панзананаяха каждый из указанных выше криогенных процессов наиболее интенсивно развивается на определенном участке реки (в верхнем, среднем или нижнем течении), как было установлено при маршрутных наблюдениях и изучении картографического материала.

Долина р. Панзананаяха разделена на три участка – верхнего, среднего и нижнего течений – по гидрометрическим и особым условиям, как это принято в гидрологии [Выржиковский и др., 1970]. Длина каждого участка составляет примерно 2 км. Краткая характеристика долины с наиболее важными свойствами, влияющими на возникновение и распределение ЧРФ, приводится ниже.

К верхнему течению (см. рис. 2, б) мы относим часть реки от истоков до среднего течения, характеризующуюся V-образной долиной, узким (до 10 м) днищем и хорошо выраженной бровкой долины, отделяющей ее от окружающих склонов водосбора. В верхнем течении регулярный сход криогенных оползней в связи с узостью долины оказывает заметное влияние на гидрологический режим реки, образуя подпорные участки с временными проточными водоемами. В среднем течении (см. рис. 2, в) долина характеризуется корытооб-

разной формой, а плоское днище расширяется за счет увеличения водности реки и удаления поступающего с бортов долины материала. Ширина днища здесь составляет 10–50 м. Бровки долины выражены слабо и практически сливаются со склонами водосбора. Русло реки в среднем течении характеризуется широким проявлением термокарста в днище в связи с относительно более высокой водностью (тепловым воздействием воды) при значительной мощности и теплоизолирующем влиянии снега. Склоновые отложения, несмотря на активность их движения, не образуют подпрудных водоемов, поскольку оползневые тела не достигают русла в связи с большей шириной долины. Сток воды и наносов полностью зависит от термокарстовых образований в русле реки. В нижнем течении (см. рис. 2, г) ширина днища изменяется в широких пределах – от 50 м на участках, примыкающих к среднему течению, до 1 км в зоне выхода реки в пойму р. Мордыха. Ширина долины полностью препятствует влиянию склоновых процессов на днище речной долины. Сток воды зависит от термокарстовых образований в русле реки меньше, чем в среднем течении, но значительно больше, чем в верхнем.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Длина р. Панзананаяха составляет 6 км. Наши измерения показали, что в маловодные годы (2005–2006 гг.) максимальные расходы воды от верхнего течения к нижнему увеличиваются от 1 до 15 л/с (табл. 1). В более многоводные годы (2007–2008 гг.) максимальные расходы воды существенно возрастают и составляют в верхнем течении 5–15 л/с, в нижнем – до 360 л/с, что сопровождается увеличением мутности потоков (см. табл. 1).

Влияние сточных и проточных водоемов проявляется в речном стоке через регулирующее воздействие на внутригодовой гидрологический режим рек [Михайлов и др., 2005]. Основное регулирующее влияние ЧРФ на гидрологический режим р. Панзананаяха оказывается через объем воды, вмещающийся в них суммарно на всем протяже-

Таблица 1. Гидрологические характеристики р. Панзананаяха за 2005–2008 годы наблюдений

Год	Максимальные расходы воды, л/с		Максимальная мутность, г/м <sup>3</sup>	
	ВТ	НТ	ВТ	НТ
2005	1	15	15	10
2006	3	60	61	17
2007	5	90	5120	33
2008	15	360	3180	28

Примечание. ВТ – верхнее течение, НТ – нижнее течение.

Таблица 2. Гидроморфометрические характеристики р. Панзананаяха в меженный период 2005 г.

Номер гидроствора	Дата	Расстояние от истока, км	Средняя глубина потока, м	Средняя ширина потока, м	Живое сечение потока, м <sup>2</sup>	Длина участка реки, м	Объем воды на участке реки, м <sup>3</sup>
1	31.08.2005	0,5	0,068	0,21	0,014	1000	14
2	31.08.2005	1,0	0,063	0,17	0,012	1000	12
3	31.08.2005	2,0	0,180	0,20	0,036	1000	36
4	30.08.2005	3,0	0,180	0,20	0,036	1000	36
5	28.08.2005	4,0	0,160	0,20	0,032	1000	32
6	29.08.2005	6,0	0,160	0,17	0,027	1000	27
<i>Среднее</i>			0,160	0,21	0,035	1000	26
<i>Сумма</i>						6000	157

нии реки. За счет зарегулированности стока происходит замедление водо- и теплообмена в гидрографической сети, поскольку вода удерживается в ЧРФ. Чем больше ЧРФ в речном бассейне и больше их объем, тем медленнее водообмен в его гидрографической сети. Во время половодья и паводков увеличение уровня и расходов воды происходит медленнее, но и спад воды в межень также сглаживается. Исследования влияния мелких водоемов в зоне распространения многолетнемерзлых пород [Арэ, 1974; Балобаев, Шасткевич, 1974; Гаврилова, Попов, 1974; Павлов, 1979, 1984; Фельдман, 1984; Булдович и др., 1991] показывают их согревающее влияние на температурный режим донных отложений.

Распределение ЧРФ в русле р. Панзананаяха неравномерно. Первые проявления термокарста наблюдаются в верхнем течении р. Панзананаяха на втором километре от истока. В среднем течении термокарстовые формы встречаются наиболее часто. В нижнем течении число ЧРФ уменьшается.

В русле р. Панзананаяха выявлено 236 ЧРФ, связанных с проявлением термокарста. В верхнем течении их насчитывается 17, что составляет 7 % общего количества. В среднем течении сосредоточено максимальное количество ЧРФ – 125, т. е. 53 % общего числа, а в нижнем течении насчитывается 94 ЧРФ (40 %). Общая длина ЧРФ составляет 1537,5 м при общей длине постоянного русла реки 6 км, или более 25 % общей длины реки. Суммарный объем ЧРФ составляет 4185 м<sup>3</sup>, что в 27 раз превышает гипотетический объем воды в русле (табл. 2). Гипотетический объем рассчитан

как произведение длины реки на среднее значение живого сечения потока в меженный период (см. табл. 1) в протоках, соединяющих ЧРФ, как если бы в русле не было термокарстовых просадок. В верхнем течении объем ЧРФ, заполненных водой, равен 205 м<sup>3</sup>, в среднем он увеличивается до 2795 м<sup>3</sup> и в нижнем составляет до 1185 м<sup>3</sup>. Еще одна гидрологическая характеристика, отражающая регулирующее влияние термокарста на водный режим рек, – период условного водообмена, или период условного возобновления вод. Эта характеристика представляет время, в течение которого произойдет полная замена вод в водном объекте и получается делением объема воды на расход [Михайлов и др., 2005].

Гидрологические измерения и расчеты показывают, что максимальное время водообмена, как характеристики зарегулированности стока, наблюдается в среднем течении (табл. 3), минимальное – в верхнем. В верхнем течении время водообмена за счет ЧРФ в летнюю межень 2005 г. в 9 раз больше по сравнению с гипотетическим (рассчитанным из гипотетического объема), в среднем течении – в 36 раз и в нижнем – в 21 раз.

Параметры ЧРФ распределены по длине реки следующим образом. Их средняя длина вниз по течению увеличивается с 6,33 м в верхнем течении до 7,55 м в среднем, затем уменьшается до 5,23 м в нижнем течении (табл. 4). Средняя ширина этих форм постепенно увеличивается с 2,39 до 2,73 м.

Таблица 3. Гидроморфометрические характеристики и время водообмена в р. Панзананаяха в меженный период 2005 г.

Течение реки	Объем воды, м <sup>3</sup>		Время водообмена, ч	
	в ЧРФ	в русле без ЧРФ	гипотетическое	наблюдаемое
Верхнее	205	26	2	18
Среднее	2795	72	4	144
Нижнее	1185	62	2	42

Таблица 4. Гидроморфометрические характеристики ЧРФ на различных участках русла р. Панзананаяха

Течение реки	Параметры ЧРФ*				
	Число	Длина, м	Ширина, м	Глубина, м	Объем, м <sup>3</sup>
Верхнее	17	1,50–22,0 (6,33)	0,5–8,0 (2,39)	0,25–2,06 (0,84)	0,75–59,3 (12,8)
Среднее	125	1,50–45,0 (7,55)	1,0–7,0 (2,42)	0,5–2,0 (0,99)	1,24–420,0 (22,4)
Нижнее	94	1,0–12,0 (5,23)	0,6–6,0 (2,73)	0,2–1,7 (0,8)	1,2–72,0 (12,6)

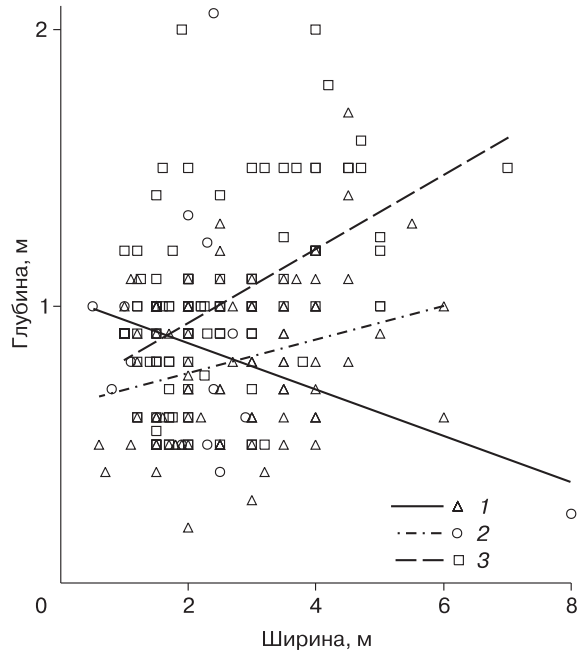
\* Диапазон значений, в скобках – среднее значение.

Коэффициент формы для ЧРФ рассчитывался как отношение длины к ширине [Симонов, 1972; Викторов, 1986]. Наблюдается увеличение коэффициента формы с 2,8 в верхнем течении до 3,1 в среднем, а затем уменьшение до 1,9 в нижнем течении, т. е. в среднем течении ЧРФ наиболее удлиненные. Средние глубины убывают от 0,84 м в верхнем течении до 0,8 м в нижнем при максимальной глубине (0,99 м) в среднем течении.

**ВЗАИМОСВЯЗЬ КРИОГЕННЫХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

В табл. 5 приведены средние значения параметров ЧРФ отдельно для верхней и нижней частей каждого участка р. Панзананаяха. Из анализа табл. 5 следует, что в пределах каждого участка существуют тенденции изменения параметров ЧРФ вниз по течению. Так, длина ЧРФ в верхнем течении увеличивается вниз по течению, в то время как в среднем и нижнем течениях эта величина изменяется очень незначительно. Ширина возрастает вниз по течению в пределах каждого участка реки. Глубина в верхнем и среднем течениях убывает вниз по течению и одновременно в этом направлении снижается объем ЧРФ. Это свидетельствует о том, что глубина ЧРФ в более узкой части долины существеннее для объема, чем ее плановые размеры. Следует особо отметить, что в нижнем течении, в отличие от среднего и верхнего, тренды изменения параметров ЧРФ незначительны. Это, вероятно, связано с тем, что в нижнем течении на всем его протяжении одинаково мала амплитуда рельефа.

На рис. 3 показана зависимость глубины ЧРФ от их ширины в верхнем, среднем и нижнем течениях р. Панзананаяха. Прямая зависимость глубины ЧРФ от ширины свидетельствует о прогрессирующей просадке пород в русле р. Панзананаяха, т. е. о доминировании процесса термокарста и русловой термоэрозии (размыва) над оползневыми и эрозионными процессами на склонах, которые приводят к аккумуляции в русле. Обратная зависимость – это свидетельство заполнения формы: по бортам термокарстовых просадок происходит



**Рис. 3. Зависимость глубины четкообразных русловых форм от их ширины в верхнем (1), среднем (3) и нижнем (2) течениях р. Панзананаяха.**

обрушение берегов и расширение русла с одновременным уменьшением глубины за счет поступления материала на дно термокарстовой просадки. Следовательно, склоновые процессы преобладают над термокарстом и термоэрозией. Из линий тренда на рис. 3 видно, что прямая зависимость наблюдается в среднем и нижнем течениях, а обратная – в верхнем. И действительно, наши наблюдения показывают, что в верхнем течении р. Панзананаяха оползневые тела достигают русла и часто перекрывают его [Лейбман, Кизяков, 2007]. Это приводит к тому, что термокарстовые просадки “сдавливаются” со стороны бортов долины, что препятствует их расширению. Термоэрозия и эрозия участвуют в удалении поступающего в термокарстовую просадку материала, приводя к углублению ЧРФ. Доминирование в верхнем течении

**Таблица 5. Гидроморфометрические характеристики ЧРФ в верхнем, среднем и нижнем течениях р. Панзананаяха по результатам анализа трендов для верхней и нижней частей каждого участка**

Участок реки	Параметры ЧРФ											
	Длина, м			Ширина, м			Глубина, м			Объем, м <sup>3</sup>		
	ВТ	СТ	НТ	ВТ	СТ	НТ	ВТ	СТ	НТ	ВТ	СТ	НТ
Верхняя часть	5,90	7,80	5,15	1,50	1,75	2,40	1,25	1,15	0,79	17,5	28,0	12,5
Нижняя часть	6,90	7,40	5,32	2,10	3,00	3,10	0,49	0,85	0,82	8,2	17,0	12,7
Среднее	6,75	7,55	5,23	2,39	5,00	2,73	0,90	0,99	0,80	13,7	22,4	12,6

Примечание. ВТ – верхнее течение, СТ – среднее течение, НТ – нижнее течение.

Таблица 6. Коэффициенты парной линейной корреляции между гидроморфометрическими характеристиками ЧРФ для верхнего, среднего и нижнего течений р. Панзананаяха

Характеристики ЧРФ	Длина, м			Ширина, м			Глубина, м		
	ВТ	СТ	НТ	ВТ	СТ	НТ	ВТ	СТ	НТ
Ширина, м	0,80	0,25	0,24						
Глубина, м	0,04	0,05	0,07	-0,32	0,47	0,27			
Объем, м <sup>3</sup>	0,80	0,65	0,62	0,59	0,64	0,71	0,52	0,39	0,53

склоновых процессов приводит также к подпорным явлениям и формированию удлинённых ЧРФ за счет подтопления и слияния нескольких ЧРФ. Это одна из наиболее существенных причин, по которой в верхнем течении наблюдаются более длинные ЧРФ, чем в нижнем (см. табл. 4).

В среднем течении происходит увеличение глубины ЧРФ одновременно с шириной, что указывает на преобладание термокарста над термоэрозией и склоновыми процессами. Образующиеся просадки расширяются и углубляются за счет термокарста в русле, условия для которого создаются при отепляющем влиянии потока достаточной водности. Вынос со склонов материала, способного заполнить термокарстовые просадки в русле, не достигает берегов р. Панзананаяха.

В нижнем течении увеличение глубины ЧРФ также сопровождается ростом их ширины. Значения для нижнего течения (2) занимают на рис. 3 промежуточное положение между трендами для верхнего (1) и среднего (3) течений. На этом участке реки значительно возрастает роль термоэрозийных процессов вследствие максимальной водности потока. Склоновые процессы на бортах долины не воздействуют на русло, так как ширина долины достигает 1 км при максимальном из наблюдавшихся смещений оползневого тела в десятки и первые сотни метров. Интенсивность термокарста снижается под воздействием донной и боковой термоэрозии. Статистическая обработка морфометрических характеристик ЧРФ показывает различие в их соотношении (табл. 6). Это обусловлено различием комплексов гидрологических и криогенных процессов, участвующих в возникновении и развитии ЧРФ. Баланс поступления и выноса материала, заиление взвесями или заполнение ЧРФ криогенными оползнями, активизация русловых процессов в разнообразных соотношениях характерны для различных участков реки. В верхнем течении наблюдается повышенная мутность воды в водных потоках относительно среднего и нижнего течений. В среднем течении происходит резкое уменьшение мутности по сравнению с верхним течением. Максимальная мутность воды в верхнем течении за период наблюдений была в 2007 г. и составила 5120 г/м<sup>3</sup> (см. табл. 1), в то время как в среднем течении она не превышала 3 г/м<sup>3</sup>. Подобные соотношения отмечались и в другие годы наблюдений. Уменьшение

мутности происходит за счет аккумуляции большей части взвесей в ЧРФ. В результате в нижнем течении мутность воды значительно меньше. Одновременно расходы воды увеличиваются, что при дефиците наносов, которые задерживаются в ЧРФ среднего течения, приводит к размыву русла и берегов. В нижнем течении наблюдается максимальный объем породы, поступающей в русло реки в результате термоэрозийного и эрозийного подмыва берегов (табл. 7). Деформация берегов происходит за счет отседания и обрушения пород в русло реки в виде блоков, не потерявших структурных связей. Размываются и кромки ЧРФ в нижнем течении, на что указывает их меньшая глубина при большей ширине по сравнению с верхним и средним течениями.

Особенностью малых рек Центрального Ямала является сильная зарегулированность стока за счет описываемых ЧРФ в руслах. Такой естественной зарегулированности стока не наблюдается на реках юга Тюменской области [Калинин и др., 1998]. В лесотундре и северной тайге сток малых рек очень редко зависит от термокарстовых просадок в их руслах, так как ПЖЛ вытаяли в этой природной зоне достаточно давно, и образованные ими ЧРФ не прослеживаются или прослеживаются слабо. Современные новообразования многолетнемерзлых пород без широкого развития ПЖЛ не могут обеспечить массового возникновения ЧРФ. Сравнение наших данных с полученными Л.И. Вейсманом [1978] показывает, что в отличие от подзоны лесотундры в тундровой зоне на Цент-

Таблица 7. Объем породы, выносимый в днище долины р. Панзананаяха в 2005–2008 гг. криогенными (криогенные оползни скольжения), эрозийными и термоэрозийными (конусы выноса), русловыми процессами (береговые отседания и обвалы) и их процентное соотношение в долине

Течение реки	Оползневые тела	Конусы выноса из овражно-балочной сети	Береговые обвалы	Сумма, м <sup>3</sup>	Доля выноса на участке, %
Верхнее	15,7	134	0	150	47
Среднее	11,2	0	57	68,2	21
Нижнее	5,4	0	95	100	32
Сумма, м <sup>3</sup>	32,3	134	152	318	100
Доля процесса в выносе, %	10,2	42	47,8	100	

ральном Ямале влияние термокарста на русла малых рек, протекающих по породам, вмещающим ПЖЛ, является ведущим криогенным процессом. По результатам наблюдений ни один из криогенных процессов, кроме руслового термокарста в виде ЧРФ, не прослеживается по всей реке от верхнего течения до нижнего. Вместе с тем влияние термокарста проявляется в определенных сочетаниях с криогенным оползанием, термоэрозией и русловыми процессами, т. е. следует говорить о доминировании термокарста или его второстепенном значении для каждого из рассматриваемых участков реки.

Анализ данных, приведенных в таблицах, показывает, что в верхнем течении рек в условиях широкого развития криогенных склоновых процессов термокарстовые просадки в руслах водотоков, как правило, сужаются за счет схода криогенных оползней и конусов выноса с близко расположенных склонов V-образной долины. Максимальное количество ЧРФ и максимальный объем воды, содержащейся в них в среднем течении, свидетельствуют о том, что склоновые процессы здесь не играют существенной роли и не препятствуют самому масштабному проявлению термокарста. В нижнем течении уменьшение количества ЧРФ по сравнению со средним течением указывает на сдерживающий фактор в виде русловой термоэрозии и эрозии.

## ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований выявлены закономерности возникновения, развития и распределения ЧРФ в русле модельной реки Панзананаяха от верхнего течения к нижнему, что позволяет сделать следующие выводы.

1. Определено, что ЧРФ образуются в результате действия взаимосвязанных и взаимообусловленных криогенных и гидрологических процессов – термокарста, криогенного оползания, русловых процессов, термоэрозии, стока воды и наносов. Значение термоэрозии заключается в размыве многолетнемерзлых пород и образовании линейных русловых форм. Донная термоэрозия наиболее характерна для овражно-балочных систем и верховьев рек. Боковая термоэрозия приводит к размывам и подмывам берегов, что сопровождается русловыми деформациями в нижнем течении. При тепловом воздействии потока на ПЖЛ происходит их вытаивание и образование ЧРФ в русле р. Панзананаяха практически на всем ее протяжении.

2. Южная граница ЧРФ в Западной Сибири проходит по лесотундре, где они проявляются незначительно в виде унаследованных русловых форм, так как ПЖЛ в этой подзоне полностью вы-

таяли. Современные ЧРФ приурочены к зоне тундр с широко развитыми полигонально-жильными льдами.

3. Возникновение и развитие ЧРФ возможно только в руслах малых рек с максимальными расходами воды не более 0,5–1,0 м<sup>3</sup>/с, при больших расходах воды термокарст по ПЖЛ в руслах подавляется термоэрозией и русловыми процессами.

4. На всем протяжении р. Панзананаяха форма ее долины оказывает определяющее влияние на развитие ЧРФ в русле реки. В верхнем течении V-образная долина с наиболее крутыми бортами вплотную подходит к руслу. Сход криогенных оползней сопровождается поступлением большого количества породы непосредственно в русло, что препятствует возникновению ЧРФ, но не исключает его. В среднем течении в корытообразной долине поступление осадков с ее бортов в русло реки практически отсутствует, что способствует возникновению ЧРФ. При выходе р. Панзананаяха в нижнем течении в пойму влияние склоновых процессов на русло полностью исключается, что также создает благоприятные условия для образования ЧРФ.

5. Установлено, что формирование ЧРФ на различных участках реки определяется комплексами криогенных процессов, ведущими из которых являются криогенное оползание в верхнем течении рек, термокарст в среднем течении и термоэрозия – в нижнем. Наиболее динамичные и сложные комплексы процессов характерны для верхнего течения рек с периодической активизацией криогенных оползней скольжения. Термокарстовый комплекс образуется в среднем течении, где активность склоновых процессов пониженная. Термоэрозионно-термокарстовый комплекс формируется в нижнем течении, что считается результатом более интенсивного проявления термоэрозии и русловых процессов, чем термокарста.

## Литература

- Арз Ф.Э. Тепловой режим мелких озер таежной зоны Восточной Сибири (на примере Центральной Якутии) // Озера криолитозоны Сибири. Новосибирск, Наука, 1974, с. 98–116.
- Арз Ф.Э., Ярков Ю.Н. Деформация речных берегов на Ямале // Линейные сооружения на вечномерзлых грунтах. М., Наука, 1990, с. 35–42.
- Балобаев В.Т., Шасткевич Ю.Г. Расчет конфигурации таликовых зон и стационарного температурного поля горных пород под водоемами произвольной формы // Озера криолитозоны Сибири. Новосибирск, Наука, 1974, с. 116–127.
- Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. Л., Гидрометеоздат, 1988, 456 с.
- Барышников Н.Б., Самусева Е.А. Системный подход к оценке сопротивлений русел. СПб., РГТМИ, 1992, 79 с.

- Булдович С.Н., Гарагуля Л.С., Типенко Г.С., Серегина Н.В.** Математическое моделирование кондуктивно-конвективного теплопереноса в таликах криолитозоны // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология, 1991, № 5, с. 60–71.
- Вейсман Л.И.** Обобщенная классификация криогенных процессов и явлений // Криогенные процессы. М., Наука, 1978, с. 3–9.
- Великанов М.А.** Динамика русловых потоков. Т. II. Наносы и русло. М., Гостехтеоретиздат, 1955, 323 с.
- Викторов А.С.** Рисунок ландшафта. М., Мысль, 1986, 179 с.
- Выржиковский В.К., Плащев А.В., Чекмарев В.А.** Экспедиционные гидрологические исследования. Л., Гидрометеоздат, 1970, 279 с.
- Гаврилова М.К., Попов П.П.** Микроклимат озер Центральной Якутии // Озера криолитозоны Сибири. Новосибирск, Наука, 1974, с. 67–82.
- Геокриология СССР.** Западная Сибирь / Отв. ред. Э.Д. Ершов. М., Недра, 1989, 454 с.
- Дроздов Д.С.** Информационно-картографическое моделирование природно-техногенных сред в геокриологии: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Тюмень, 2004, 49 с.
- Калинин В.М., Ларин С.И., Романова И.М.** Малые реки в условиях антропогенного воздействия (на примере Восточного Зауралья). Тюмень, Изд-во Тюм. ун-та, 1998, 220 с.
- Колобовский Е.Ю.** Ландшафтоведение. М., Изд. центр "Академия", 2006, 480 с.
- Лейбман М.О., Кизяков А.И.** Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М., Ин-т криосферы Земли СО РАН, 2007, 206 с.
- Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А.** Гидрология. М., Высш. шк., 2005, 463 с.
- Павлов А.В.** Теплофизика ландшафтов. М., Наука, 1979, 283 с.
- Павлов А.В.** Энергообмен в ландшафтной сфере Земли. Новосибирск, Наука, 1984, 256 с.
- Работа** водных потоков / Отв. ред. Р.С. Чалов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1987, 194 с.
- Романенко Ф.А.** Формирование озерных котловин на равнинах Арктической Сибири: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1997, 25 с.
- Симонов Ю.Г.** Региональный геоморфологический анализ. М., Изд-во Моск. ун-та, 1972, 251 с.
- Соколов А.А.** Гидрография СССР. Л., Гидрометеоздат, 1952, 280 с.
- Ушборн А.Л.** Мир холода. Геокриологические исследования. М., Прогресс, 1988, 384 с.
- Фельдман Г.М.** Термокарст и вечная мерзлота. Новосибирск, Наука, 1984, 253 с.
- Хименков А.Н., Брушков А.В.** Введение в структурную криологию. М., Наука, 2006, 278 с.
- Чалов Р.С.** Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М., Изд-во ЛКИ, 2008, 608 с.
- Юрьев И.В.** Проблемы эксплуатации объектов газового комплекса в береговой зоне Западного Ямала // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 1, с. 46–54.
- Brown R.J.E.** Permafrost in Canada. Toronto, Univ. of Toronto Press, 1970, 234 p.
- Ferrains O.J., Kachadoorian R., Greene G.W.** Permafrost and related engineering problems in Alaska // U.S. Geol. Surv., 1969, profes. pap. 678, 37 p.
- Hopkins D.M., Karlstrom T.D.** Permafrost and ground water in Alaska // U.S. Geol. Surv., 1955, profes. pap. 264-F, p. 113–146.
- Lawson D.E., Brown J.** Disturbance of permafrost, massive ground ice, and surficial materials // Tundra disturbance and recovery following the 1949 exploratory drilling, Fish Creek, Northern Alaska. Hanover, New Hampshire, 1978, p. 28–78.
- Pewe T.L.** Effect of permafrost upon cultivated fields // U.S. Geol. Surv., Fairbanks, 1954, bull. 989-F, p. 315–351.
- Van Everdingen R.O.** Multi-Language Glossary of Permafrost and Related Ground ice terms. Boulder, USA, Nat. Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciol., 1998 (rev. May, 2005), 267 p.

*Поступила в редакцию  
8 сентября 2009 г.*