

РОЛЬ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В ФОРМИРОВАНИИ ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА УСТЬЕВ РЕК ВОДОСБОРА СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Е. Н. Долгополова

ФГБУН Институт водных проблем РАН (Москва, Российская Федерация)

Исследуются корреляционные связи гидрологических характеристик рек водосбора Северного Ледовитого океана, устья которых находятся в зоне многолетнемерзлых пород разных типов. Сравнительный анализ годового стока наносов 20 рек этого района показал аномально большой сток наносов рек Юкон (Аляска, США) и Маккензи (Канада). Обсуждается влияние потепления климата на сток воды и наносов рек в криолитозоне. Приводятся данные об увеличении температуры воздуха на территории бассейнов рек, вызывающие рост температуры поверхности грунта и глубины протаивания мерзлого грунта. Обсуждаются миграция южной границы распространения многолетнемерзлых пород и ее роль в формировании легкоразмываемых грунтов на поверхности водосбора. Исследуется влияние длины участков рек, расположенных в многолетнемерзлых грунтах разных типов, на сток наносов в устьях рек на побережье Северного Ледовитого океана.

Ключевые слова: устья рек, Северный Ледовитый океан, гидрологический режим, многолетнемерзлые породы, изменения климата.

Статья поступила в редакцию 24 июля 2018 г.

Введение

Интерес к исследованию устьев рек, впадающих в моря Северного Ледовитого океана, растет в связи с освоением территорий, прилегающих к устьям, и добычей углеводородов, с одной стороны, и желанием человека сохранить сформировавшиеся в этих устьях уникальные экосистемы — с другой. Кроме того, изменения климата, приводящие к росту среднегодовых температур воздуха на Земле и в прибрежных районах Арктики [1], вызывают изменение количества осадков, увеличение глубины оттаивания многолетнемерзлых пород (ММП) и развитие деструктивных процессов, что также сказывается на режиме устьев рек в этих районах [2—5].

Значительная часть побережья Северного Ледовитого океана в России, Канаде и США (полуостров Аляска) лежит в зоне многолетнемерзлых пород. ММП занимают около 24% суши (территория 22,8 млн км²), в том числе более 60% территории России (рис. 1) [6]. Шельф Северного Ледовитого океана составляет от десятков километров у западного побережья Канады и Гренландии до 900 км

на побережье Баренцева моря [7]. Отношение площадей Северного Ледовитого океана и впадающих в него водосборных бассейнов рек составляет 40%, в то время как для всех океанов на Земле оно обратное. В России устья рек, впадающих в арктические моря, от Печоры до Анадыря (табл. 1) находятся в зоне ММП разных мощности и свойств [8; 9]: Печора (Баренцево море); Обь, Енисей, Пяси́на, Таймыра (Карское море); Хатанга, Анабар, Оленёк, Лена, Яна (море Лаптевых); Индигирка, Колыма (Восточно-Сибирское море); Анадырь (Берингово море). Устья рек Северной Америки: Маккензи, Нельсон, Черчилл (Канада), Юкон, Колвилл и Сагаванирток (США, Аляска) — также расположены в криолитозоне [10—13].

Неустойчивость мерзлых пород зависит в основном от изменений климата, геологических особенностей рельефа, почвенно-растительного покрова и хозяйственной деятельности человека. Дегра́дация ММП и таяние ледников в условиях изменения климата сказываются на режиме устьевых областей северных рек, так как многие из них берут начало в ледниковых областях и протекают по территории ММП. Лы́дистая основа ландшафтов в зоне ММП

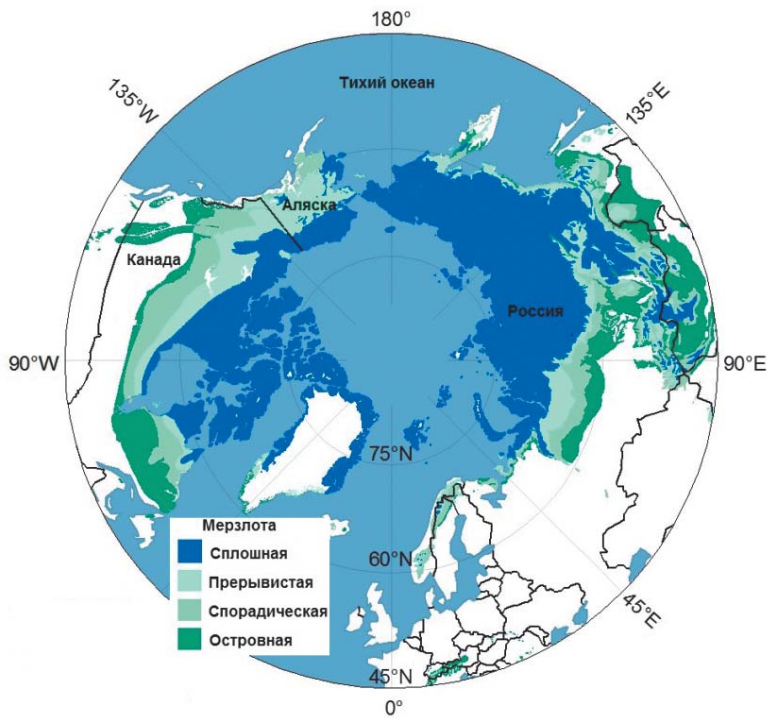


Рис. 1. Распространение мерзлых пород в Северном полушарии [6]
Fig. 1. Distribution of permafrost in the Northern Hemisphere [6]

Таблица 1. Характеристики рек водосбора Северного Ледовитого океана в порядке убывания годового стока воды W : длина реки L , площадь водосбора F и сток наносов W_s ; $W_\Sigma = W_s + W_b$ [19]

Река	Тип устья	L , км	W , км ³ /год	W_s , 10 ⁶ т/год	W_Σ , 10 ⁶ т/год	$F \cdot 10^3$, км ²	Источник
Енисей	Э—Д	4100	584	13/4,9	15/7,3	2580	[19; 20]
Обь (Иртыш)	Э—Д	5410	540	16	18,9	2990	[19; 21]
Лена	Д	4260	533	22,7	27,0	2490	[11; 21]
Маккензи	Д	1737	350	130	—	1800	[10—12]
Юкон	Д	3188	205	80	—	855	[13; 16]
Печора	Д	1809	130	6,4	8,7	322	[21; 19]
Колыма	Д	2129	118	12,3	16	647	[21]
Хатанга	Э	1636	105	1,8	5,2	364	[21]
Нельсон	Э	642	71/96	8,4	—	1072	[22; 23]
Анадырь	Э	1150	68	3,6	—	191	[21]
Пяси́на	Д	818	56	3,4	—	182	[24]
Инди́гирка	Д	1790	54	11,7	15,2	362	[21]
Таз	Д	1400	34	0,7	1,2	150	[25]
Оленёк	Д	2270	37	1,3	2,4	219	[19; 21]
Яна	Д	872	33	4,4	—	238	[21]
Пур	Д	389	32	0,8	1,2	112	[25]

Река	Тип устья	L, км	W, км ³ /год	W _{ср} , 10 ⁶ т/год	W _{ср} , 10 ⁶ т/год	F·10 ³ , км ²	Источник
Черчилл	Э	1600	42/19	7/0,3	—	282	[22; 23]
Анабар	Э	939	19	1,2	—	104	[21; 25]
Колвилл	Д	600	16	5,8	—	60	[21]
Сагаванирток	Д	290	1,6	1	—	15	[26]

Примечания: 1. Через косую черту приведены величины до и после мероприятий по регулированию стока.
2. Обозначения типов устья: Э — эстуарий, Э—Д — эстуарно-дельтовый.

при естественной эволюции является стабилизирующим фактором, а при техногенных нагрузках — усугубляющим разрушение естественных ландшафтов. Эрозия берегов и отмеченное увеличение расхода воды в устьях рек криолитозоны [4; 9; 10; 14] может способствовать изменению стока наносов.

В данной работе рассматриваются характерные черты устьев рек, расположенных в криолитозоне, и изменения их режимов в результате реакции ММП на изменение климата. Обсуждаются возможные изменения переноса наносов в устьях рек зоны ММП, вызванные изменениями климата.

Характерные черты гидрологического режима рек в зоне ММП

Гидролого-морфологический режим рек зависит от характеристик мерзлых грунтов в криолитозоне. Многолетнемерзлыми считаются грунты, температура которых сохраняется отрицательной или равной 0°C в течение двух и более лет. Свойства грунта определяют сток наносов и имеют большое значение в формировании устьев рек. При взаимодействии пресных и морских водных масс в устьевых областях зоны ММП возникает циркуляция вод, приводящая к образованию сезонномерзлых грунтов на участках проникновения осолоненных вод [15]. Ветры сгона, дующие с берега, вызывают движение морской воды с отрицательной температурой в сторону суши. Взаимодействие придонного течения осолоненных вод с промытыми пресной водой аккумулятивными формами вызывает их замерзание и образование сезонно-мерзлых грунтов. Вновь образованные мерзлые грунты на устьевом взморье слабо поддаются размыву и, оставаясь в мерзлом состоянии два-три года, превращаются в ММП, что приводит к постепенному обмелению устьевого взморья [13; 16; 17].

На многих участках рек, текущих с юга на север, возникают условия для формирования осенних зажоров и заторов льда во время весеннего вскрытия рек. Быстрое понижение температуры воздуха ниже -10°C препятствует образованию внутриводного льда в арктических устьях, и зажоры не образуются [18]. Кроме того, скорости течения в рукавах дельт малы (менее 0,5 м/с) из-за малых уклонов дельто-

вых равнин *i* (например, для реки Юкон *i* = 0,001 [13]), что также препятствует образованию зажора, и замерзание происходит путем смыкания быстро расширяющихся заберегов.

Заторы льда, образующиеся при весеннем вскрытии рек, характерны для рек, текущих в северном направлении, у которых таяние снега и льда начинается в верховьях. Образованию заторов способствуют особенности строения русла: крутой поворот, резкое сужение, наличие островов, падение уклона русла. На некоторых участках рек заторы льда образуются ежегодно. На больших реках Сибири вследствие больших расходов воды в половодье наблюдаются заторные подъемы воды на 4—6 м с повторяемостью 70—100% [18]. Малый уклон поверхности устьевой области в криолитозоне способствует катастрофическому подъему уровня воды при заторе и разливу воды, занимающему огромные площади.

Для всех устьев криолитозоны характерен особенно малый расход воды в зимнюю межень вплоть до полного промерзания некоторых устьев, например эстуариев рек Анабар и Хатанга, и отдельных рукавов дельт, например рукавов дельты Лены. Сквозные талики в руслах рек и рукавах дельт играют существенную роль в формировании стока воды, особенно зимнего. В сплошных ММП подземное питание рек зимой ограничивается водами, поступающими через сквозные талики [27]. Увеличение числа и площади сквозных таликов в руслах рек в связи с потеплением климата приведет к дальнейшему сокращению сроков ледостава.

Для устьев ММП характерен сравнительно небольшой сток наносов, основная часть которого поступает в устье во время половодья. Характерной чертой транспорта наносов в рукавах дельт является их движение в потоках воды поверх льда в начале половодья. При этом большая часть наносов минует устьевое взморье и достигает фронта дельты (Юкона, Колвилла) [13; 28]. Во время летней межени малый уклон устьевых долин способствует отложению большей части мелких речных наносов на поверхности дельты (песок) и в озерах (ил, глина), что приводит к образованию на территории дельты больших областей, сложенных легкоразмываемыми грунтами.

Весеннее половодье в реках криолитозоны происходит, как правило, при замерзших берегах, что сдерживает эрозию берегов рек и рукавов дельт. Размыву дельты препятствует распространение ледяного припая вглубь рукавов до линии бугров пучения. В дельте Юкона припай распространяется на 10—30 км от фронта подводной дельты. Несмотря на ледяной припай, дельта Юкона размывается в некоторых областях со скоростью до 30 м/год.

Одна из отличительных черт устьев рек криолитозоны — морозобойные трещины и ниши размыва, которые способствуют обрушению больших объемов берегов потоков и их переформированию, что характерно для рукавов дельт Лены, Яны, Индигирки и Колвилла [7; 11]. Например, во время вскрытия Колвилла образуются ниши до 10 м в глубину берега. Обрушение берегов, происходящее обычно после прохождения пика половодья, приводит к повышенному содержанию наносов в потоке и увеличению переноса наносов в реках и рукавах дельты.

На территории дельт зоны ММП находятся многочисленные термокарстовые озера, часть которых расположена вблизи дельтовых рукавов. Эрозия берегов этих озер приводит к присоединению к потоку наиболее близко расположенных озер, как происходит в дельтах Колвилла и Маккензи. В результате в руслах рукавов появляются области с большими глубинами, в которых оседает большое количество наносов, препятствуя их продвижению к устьевому взморью и формированию дельты выдвигения. Озеро постепенно мелеет, и на его месте зимой образуются пинго, часто не тающие летом. Примером скачкообразного развития эрозионных процессов в устье криолитозоны можно считать зарегистрированные ямы размыва русел рукавов дельты Маккензи такой глубины, которую невозможно объяснить прорывом заторов [12]. Локализация таких катастрофических размывов не поддается прогнозированию. Анализ аналогичных размывов вблизи трубопровода в России показал, что основная причина глубоких размывов в дельте Маккензи связана с процессом термокарста и с миграцией границы ММП [11].

Таким образом, перенос наносов и изменение морфологии устьев рек криолитозоны находятся под конкурирующим влиянием ММП, приводящим к сдерживанию эрозионных процессов в начале половодья и периодическому скачкообразному усилению разрушения берегов в последующий период вплоть до замерзания потока.

Материалы и методы

Выделить общие наиболее значительные факторы, которые влияют на гидрологические процессы в устьях рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, довольно трудно в связи с разнообразием географического расположения и освоения земель на территориях бассейнов рек. Для оценки роли ММП в формировании гидролого-морфологическо-

го режима устьев рек исследуется изменение одной из их основных гидрологических характеристик — стока взвешенных наносов W_s в зависимости от легко выражающихся количественно величин стока воды W и площади водосбора F рек, устья которых находятся в криолитозоне (см. табл. 1). Для анализа и сравнения используются данные о длинах рек, площадях водосбора и гидрологических характеристиках рек, приведенные в наиболее современных работах для России [5; 11; 19—21; 25; 29], а также США и Канады [7; 11—14]. Тенденции изменения стока воды и наносов рек России приводятся по материалам [9; 19], Канады и США — по [12; 14; 30—33]. Данные о некоторых российских реках уточнены по [19], в частности о расходе воды W в устье реки Анабар. По данным ежемесячных значений расхода воды Анабара на гидрологическом посту (г/п) Саскылах (примерно в 180 км от створа мыс Крест, впадения левого притока реки Суолемы, который можно считать вершиной эстуария) за 45 лет (1954—1999 гг.) рассчитан средний расход воды 454 м³/с ($W = 14$ км³/год). По данным [19], к вершине устья расход воды возрастает до 570 м³/с, тогда W составляет 19 км³/год. Величина W используется при анализе корреляционной связи W_s и W .

Река Сагаванирктон введена в рассмотрение как пример малой реки, целиком расположенной в зоне ММП и образующей дельту при впадении в залив Прудо-Бей моря Бофорта [26]. Данных о ее режиме больше, чем о других малых реках, так как частично вдоль ее русла проходит газопровод, который тянется от озера Биг Лейк вблизи залива Кук на юге прямо на север, пересекая Аляску, к заливу Прудо-Бей. По материалам [26; 32] сделана оценка величины годового стока воды и наносов (см. табл. 1). Состояние мерзлых грунтов и изменение глубины протаивания на территории бассейна Сагаванирктона приводятся по данным [34].

Величина стока наносов в устьях рек в общем случае оценивается как сумма стока взвешенных и донных наносов. Сток взвешенных наносов W_s легко определяется по расходу и мутности воды, и, как правило, эта величина приводится в литературе, например в [21], в качестве одной из характеристик реки. Оценка стока донных наносов W_b гораздо более сложна, и вопрос о наиболее достоверном методе расчета остается дискуссионным [33]. Величина W_s в несколько раз превосходит сток донных наносов W_b и часто используется как основная характеристика реки. В настоящем исследовании при наличии данных о W_s и W_b в анализе участвуют суммарные величины W_Σ [19] (см. табл. 1). Среднегодовой расход взвешенных наносов реки R определяется по рядам измерений средней концентрации наносов в створе вершины устья или в ближайшем к нему створе разной длины и наполненности. Иногда при удлинении ряда осреднения для некоторых месяцев используются восстановленные величины расхода наносов или значения, рассчитанные по

значениям мутности воды, полученным в результате математического моделирования. В [35] по значениям средней мутности воды у Енисейска оцениваются величины стока наносов в створе города Игарки. Верховье Енисея находится в зоне распространения мерзлых грунтов островного характера, на участке реки от Красноярска до впадения Ангары мерзлые грунты отсутствуют, а в районе Енисейска снова появляется островная мерзлота. Таким образом, величина стока наносов в вершине устьевой области (г/п Игарка) отражает суммарный вклад как мерзлых, так и немерзлых грунтов. Измерения мутности воды в период весеннего половодья и вскрытия устьев рек — сложная задача. Они проводятся разными методами со значительной погрешностью, поэтому сравнение величин W_s в устьях разных рек носит оценочный характер.

Сток наносов в устьях рек зависит от многих факторов, основные из которых: геологическое строение бассейна реки, климат и количество осадков, расход воды и регулирование стока реки, степень использования земель бассейна реки человеком. Данные о влиянии регулирования стока воды рек на сток наносов приводятся по [19—22]. Наличие ММП и изменение свойств мерзлых грунтов в бассейнах рек влияют на сроки замерзания и вскрытия рек, прохождение максимального расхода воды при весеннем половодье и на время запаздывания максимального расхода взвешенных наносов. Поэтому для выявления роли состояния грунта в криолитозоне используются данные о расположении границы распространения мерзлых грунтов разных типов и их характеристиках на территории России по наиболее современным данным [36—38], на территории Северной Америки — по данным [2; 39—42].

Увеличение среднегодовой температуры воздуха T приводит к повышению температуры поверхности земли T_g и мерзлых грунтов на разных глубинах T'_g , к изменению свойств мерзлых грунтов и в конце концов к изменению типа распространения ММП. В северных районах в период сезонного протаивания температура мерзлых пород изменяется без участия внешних факторов теплообмена за счет фазовых переходов в мерзлом грунте. В холодные месяцы после полного промерзания активного слоя мерзлая толща начинает активно взаимодействовать с атмосферой через снежный покров. Таким образом, на устойчивость криолитозоны большее влияние оказывает зимний сезон, чем летний. Циклические изменения климата вызывают периодические колебания толщины слоя сезонного протаивания d , последующие изменения ландшафта и формирование легкоразмываемых грунтов в зоне миграции границы распространения ММП. Таким образом, исследование изменений T , T_g , T'_g , d и миграции границы распространения сплошных ММП дает возможность оценить изменение свойств мерзлых грунтов и влияние этих изменений на сток наносов в устьях рек.

Определяются длины участков рек, расположенных в сплошных мерзлых грунтах L_c , в прерывистых — L_d и вне зоны ММП. Длина L_d включает в себя длину участков в прерывистых, спорадических и островных типах мерзлых грунтов, длина расположенного в мерзлых грунтах участка реки $L_p = L_c + L_d$. Исходя из того соображения, что чем большая часть реки расположена вне зоны ММП, тем больше должен быть сток наносов в устье, мы используем отношения длин участков рек в разных типах мерзлых грунтов в качестве параметров. Например, чем меньше параметр L_p/L , тем больше участок реки, находящийся вне зоны ММП, при $L_p/L = 0$ вся река находится вне мерзлых грунтов, а для реки, полностью находящейся в зоне ММП, $L_p/L = 1$. Только у трех рек из табл. 1 $L_p/L \neq 1$, поэтому вводится параметр $k = (L - L_c)/L$, увеличение которого свидетельствует об уменьшении участка реки, находящегося в сплошных мерзлых грунтах, и в пределе $k = 1$ при отсутствии сплошных ММП в долине реки. Таким образом, k показывает, насколько существенную роль играет ММП в гидрологическом режиме реки и устья. Длины участков рек, расположенных в зоне мерзлых грунтов разных типов, оцениваются по упомянутым картам и по работам, в которых обнаружена соответствующая информация. При существенных сдвигах границы ММП использовались уточненные современные данные.

Обсуждение результатов

Связь стока наносов со стоком воды и площадью водосбора

Сток воды крупных рек криолитозоны имеет тенденцию к росту в условиях потепления климата. В устьях рек Обь, Енисей и Лена, имеющих относительно длинные ряды наблюдений (60—70 лет), ежегодный рост расхода воды Q составляет от 0,02% до 0,18% величины среднемноголетнего расхода воды [9]. Анализ более коротких рядов значений Q в устьях не зарегулированных рек Яна и Оленёк дает более значительный рост Q от 0,57% до 1,4% в год. Это может быть вызвано несколькими причинами: во-первых, слишком короткими рядами Q , полученными в периоды более резкого роста температуры воздуха в устьях, во-вторых, некоторую роль может играть и тот факт, что в верховьях этих рек находятся области наибольшего роста температуры воздуха, что способствует более резкому увеличению стока при отсутствии регулирования.

Распространение ММП в Северной Америке и устья рассматриваемых рек показаны на рис. 2. Расход воды рек северной Канады продемонстрировал существенный рост в период 1989—2013 гг. по сравнению величиной Q за весь период наблюдений и составил 18,1% [43]. Согласно детальным исследованиям изменения расхода воды значительных притоков Маккензи Q в верхнем течении реки (Форт Симпсон) после впадения левого притока Лиард растёт на 3,5% в 10 лет в период 1939—2013 гг.

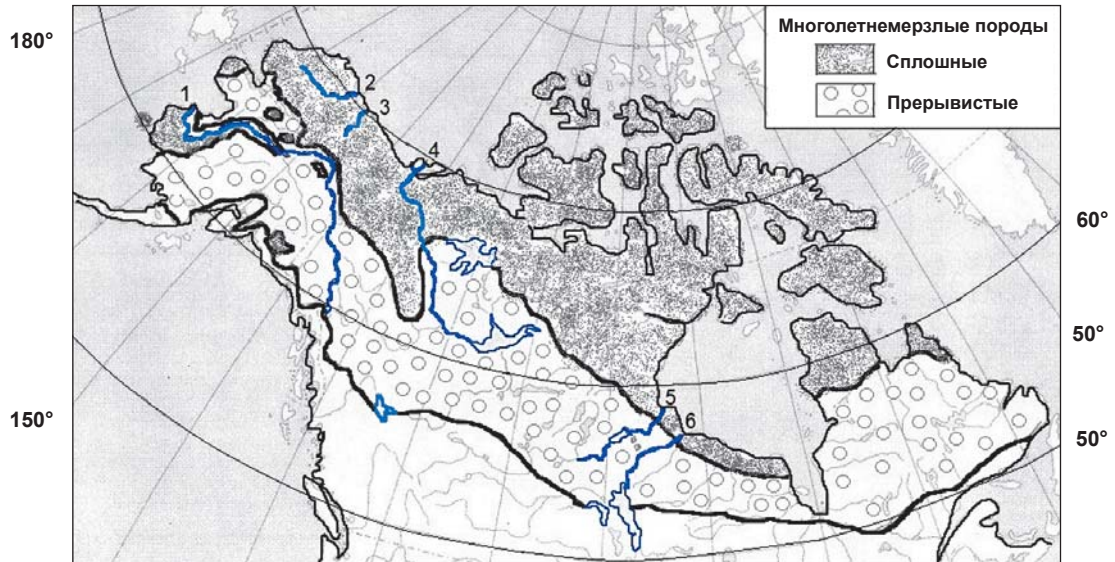


Рис. 2. Схема границ сплошной и прерывистой мерзлоты в Северной Америке с реками, устья которых отмечены номерами: Юкон (1), Колвилл (2), Сагаванирктток (3), Маккензи (4), Черчилл (5), Нельсон (6)

Fig. 2. The boundaries of continuous and discontinuous permafrost in the Northern America with rivers, which mouths are marked on the scheme by numbers: the Yukon (1), the Colville (2), the Sagavanirktok (3), the Mackenzie (4), the Churchill (5), the Nelson (6)

[14]. Этот вывод подтверждает полученную ранее оценку о некотором росте Q в вершине устьевой области Маккензи (г/п Ред-Арктик-Ривер) примерно на 2,1% в 10 лет в период 1973—2011 гг. [11].

На основе данных о расходах воды российских (Северная Двина, Печора, Обь, Енисей, Лена) и североамериканских (Юкон, Маккензи) рек и различных сценариев изменения климата в [44] получен прогноз увеличения стока рек в Северный Ледовитый океан к середине XXI в. на 10—20% относительно их величин в начале века. Этот вывод подтверждается результатами работы [45]. В ней приводится прогноз изменения годового стока Юкона, Маккензи, Черчилла, Нельсона, Печоры, Оби, Енисея, Лены, Колымы к 2100 г. по сравнению с реперным периодом 1960—1990 гг. Прогноз рассчитан по нескольким математическим моделям, описывающим возможные сценарии изменения климата. Интересно, что прогноз стока большинства рек, текущих вне зоны мерзлоты, дает уменьшение W к 2100 г. Таким образом, при наличии зависимости $W_S = f(W)$ можно ожидать увеличения стока наносов в устьях рек криолитозоны.

Из табл. 1 видно, что диапазон изменения величин W_S в устьях рек криолитозоны очень широк: 0,3—130 млн т/год, площади водосбора отличаются более чем на два порядка величин. Исследование величин стока наносов в арктических устьях 14 крупных рек, выявившее аномально большую величину W_S в устьях Юкона и Маккензи [46], показало, что их сток наносов сравним с величинами W_S в устьях Нила и Дуная. Связь стока наносов с площадью водосбора описывается полиномом четвертой степени для нормированных рядов W'_S и F'

для всех рек из табл. 1 с достоверностью $R^2 = 0,64$. Линейной зависимостью описать связь $W_S = f(F)$ для всех этих рек невозможно, хотя увеличение W_S с ростом площади водосбора считается закономерным. Диапазон изменения величин W_S в устьях рек криолитозоны в табл. 1 исключая Юкон и Маккензи составляет 0,6—23 млн т/год, корреляционный анализ зависимости $W_S = f(F)$ для рек из табл. 1 без Юкона и Маккензи показывает, что коэффициент корреляции рядов W_S и F составляет $r = 0,73$, что попадает в диапазон изменения $r = 0,7—82$, определенный по 280 рекам мира [30].

Интересно, что для всего ряда рек связь между стоком воды и площадью водосбора очень велика с $r = 1$, хотя бассейны рассматриваемых рек расположены в разных природных зонах. Этот вывод подтверждается исследованиями зависимости объема годового стока воды в разных створах Юкона от площади водосбора, которая близка к линейной, несмотря на неоднородность природных условий [47].

Поскольку сток наносов в Юконе и Маккензи в несколько раз превосходит W_S остальных рек зоны ММП, линейная зависимость $W_S = f(W)$ для всех рек из табл. 1, также как и $W_S = f(F)$, не дает сколь угодно значащих коэффициентов достоверности. Линейная аппроксимация зависимости $W_S = f(W)$ для всех рек криолитозоны, кроме Юкона и Маккензи, дает коэффициент достоверности $R^2 = 0,63$ при использовании величины $W_S = 15 \cdot 10^6$ т/год в устье Енисея до введения в строй Красноярской ГЭС (рис. 3); при современном стоке наносов Енисея $R^2 = 0,5$. Коэффициент корреляции рядов значений W_S и W дает значения 0,8 и 0,7 соответственно.

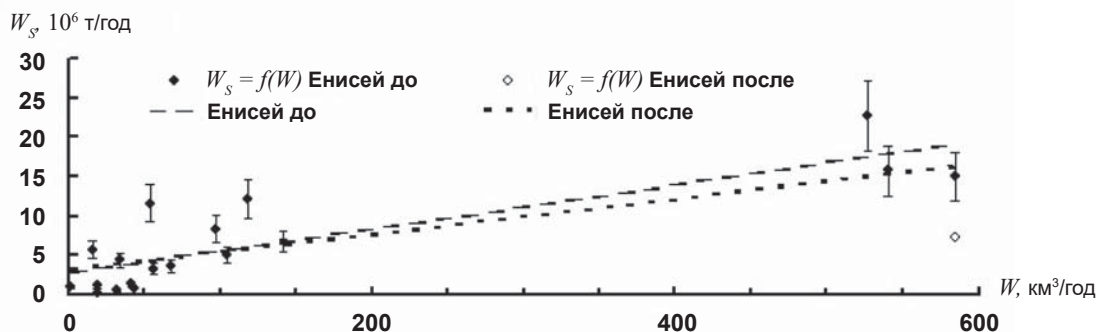


Рис. 3. Зависимость стока наносов от стока воды в устьях рек криолитозоны, исключая реки Юкон и Маккензи. Отклонение от значения W_s (табл. 1) – 20%
 Fig. 3. Dependence of sediment discharge on water flow in the mouths of the permafrost zone rivers, excluding the Yukon and the Mackenzie. Deviation from the value of W_s (Table 1) – 20%

Свойства ММП

Границы распространения и свойства мерзлых грунтов зависят от колебаний среднегодовой температуры воздуха и тенденции к росту T в условиях потепления климата. Тренд среднегодовой температуры воздуха зависит от географического расположения рассматриваемой области. Сравнение T приповерхностного слоя атмосферы Земли в 2017 г. с температурой, осредненной за 1880—1920 гг. («доиндустриальный» период), показало рост средней T на +1,17°C [48]. При этом наибольший рост T при сравнении с более близким по времени периодом (1951—1989 гг.) наблюдался в приполярных областях Северной Америки и России, а также в центральных областях Сибири и составил 2—3°C.

Исследование осредненных аномалий среднегодовой температуры воздуха в северной полярной области России в широтной зоне 60—85° с. ш. [37] показало наличие положительного линейного тренда $T \sim 0,6^\circ\text{C}$ для всей рассматриваемой области в 1936—2009 гг., для широтной зоны 60—70° с. ш. за 74 года $T \sim 0,8^\circ\text{C}$.

Устойчивое потепление климата наблюдалось с конца 1960-х до середины 1990-х годов, причем максимальный

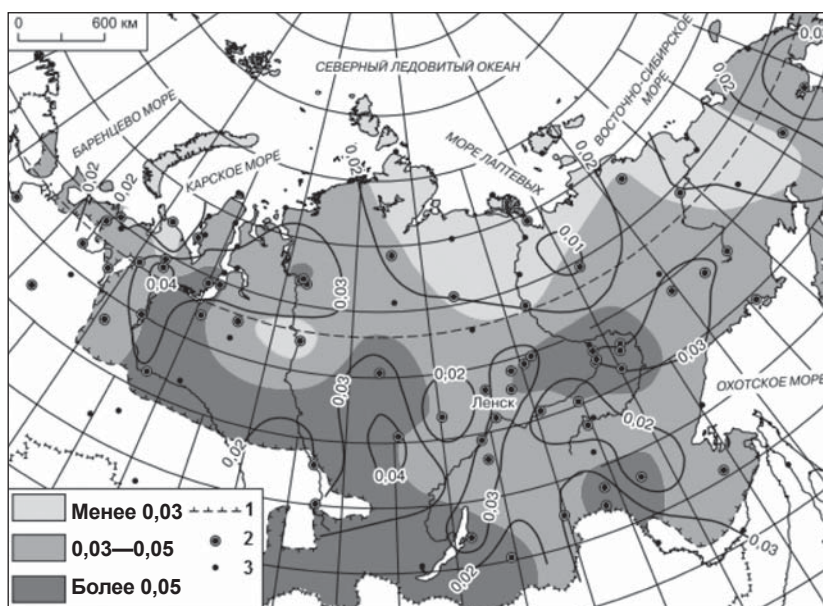


Рис. 4. Изменение температуры воздуха (оттенки серого) и грунта на территории ММП в России (граница криолитозоны – 1): T и T_g (за 1965–2005 гг.) в °C/год, станции измерений T и T_g (2), станции измерения T (3) [36]
 Fig. 4 Changes in air temperature (shades of gray) and soil temperature on the PFZ (permafrost zone) territory in Russia (the permafrost zone boundary – 1): T and T_g (for 1965–2005) in °C/year, T and T_g measurement stations (2), measurement stations T (3) [36]

рост T (1,8—2,7°C) отмечался в субарктических и умеренных широтах, в континентальных районах Якутии, Забайкалья, Западной Сибири [36]. В то же время в конце XX — начале XXI в. рост температуры воздуха замедлился, а на ряде станций зарегистрировано похолодание. Изменение T за 15—18 лет с 1990 г., приведенное на рис. 4, свидетельствует о небольшом росте T на территории арктических устьев рек 0,03°C/год за исключением таких, как устья рек Обь, Пур, Таз, Енисей и Пясины, где T росла со скоростью 0,03—0,05°C/год.

От колебаний T зависят главные показатели состояния ММП — среднегодовая температура грунта T_g и глубина d сезонно-талого слоя (СТС), также важны вертикальная мощность, характеризующая глубиной залегания нижней границы, и льдистость мерзлых грунтов.

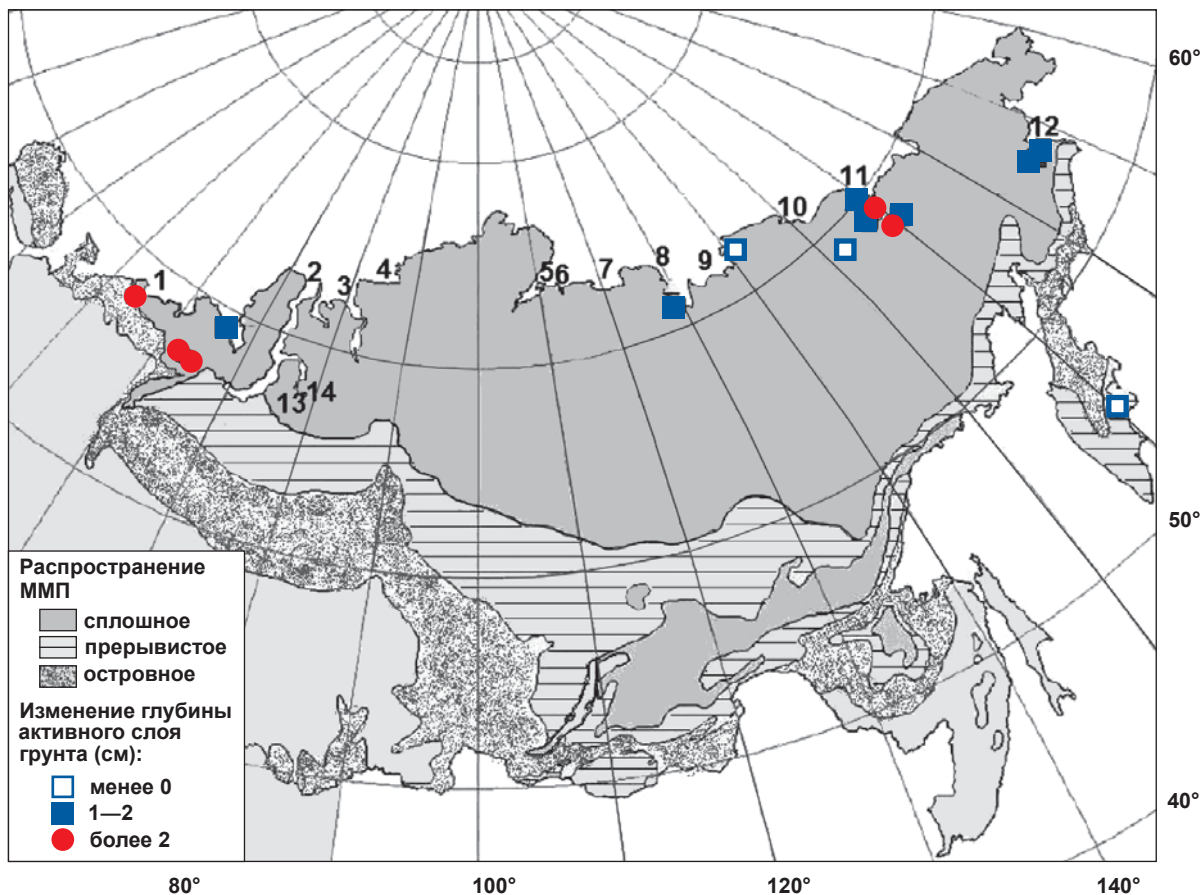


Рис. 5. Границы распространения мерзлых грунтов различных типов и изменение СТС на станциях наблюдений в период 1999–2008 гг. [38]. Номерами обозначены устья рек: 1 – Печоры, 2 – Оби, 3 – Енисея, 4 – Пясины, 5 – Хатанги, 6 – Анабара, 7 – Оленька, 8 – Лены, 9 – Яны, 10 – Индигирки, 11 – Колымы, 12 – Анадыря, 13 – Пура, 14 – Таза

Fig. 5. The distribution boundaries of permafrost of various types and the change in the STS (seasonally tabetisol) measured at the hydrological stations in the period 1999–2008 [38]. The numbers indicate the river mouths: 1 – the Pechora, 2 – the Ob, 3 – the Yenisei, 4 – the Pyasina, 5 – the Khatanga, 6 – the Anabar, 7 – the Olenek, 8 – the Lena, 9 – the Yana, 10 – the Indigirka, 11 – the Kolyma, 12 – the Anadyr, 13 – the Pur, 14 – the Taz

Результаты исследований корреляции T и T_g (см. рис. 4) [36] свидетельствуют о наличии больших районов в среднем и верхнем течении рек России, впадающих в Северный Ледовитый океан, где рост температуры грунта существенно отстает от увеличения T . Это районы прерывистых и островных ММП, в которых большая часть поступающего к Земле тепла расходуется на фазовые переходы в мерзлых грунтах, а также на уменьшение площади островов мерзлоты. Таким образом, в среднем течении рек могут образовываться более легко размываемые грунты, что будет способствовать увеличению W_S .

В России в 1970–2005 гг. в зоне сплошного распространения ММП возникли новые талики, увеличилась d слоя протаивания и активизировался процесс термокарста. Данные мониторинга многолетней мерзлоты на побережье арктических морей [38] показывают тренды увеличения T_g и d (рис. 5). Сравнение изменения величин T_g и d по данным [36; 38] показывает, что в районе устьев Оби, Лены, Колымы, Анадыря рост T_g приводит к некоторому

увеличению глубины протаивания. В то же время на станциях в устье Яны и в низовьях Индигирки за короткий период 1999–2008 гг. зарегистрировано уменьшение глубины протаивания. Авторы [36; 38] отмечают катастрофический недостаток данных геокриологических стационаров. Эти результаты показывают, что необходим совместный анализ более длинных рядов d и T для выводов об определенной тенденции в состоянии ММП.

Наибольший сдвиг границы ММП к северу в 1970–2005 гг. наблюдался на европейской территории России: в Печорской низменности — на 30–40 км, на равнинах Приуралья — до 80 км [38]. Сравнение современных границ распространения ММП, приведенных в отчете комиссии «Greenpeace» в России за 2010 г. [49], с границами на рис. 5 [38] и данными более ранней фундаментальной работы [50] не обнаруживает существенного сдвига границы распространения ММП к северу, и низовья рек от Печоры до Анадыря находятся в зоне сплошного распространения ММП.

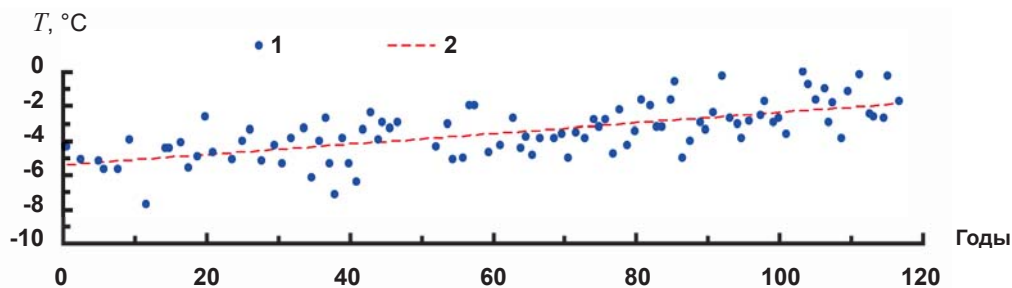


Рис. 6. Изменение T в верхнем течении Маккензи на г/п Хей Ривер за 1896–2011 гг. по данным [42]:

1 – T , 2 – линейный тренд

Fig. 6. Change of T at the Mackenzie upper stream (the Hay River hydrological station) during 1896–2011 using data [42]:

1 – T , 2 – linear trend

В Канаде в долине Маккензи 6–9 тыс. лет назад наблюдался относительно теплый период, южная граница ММП находилась севернее современного положения, и толщина слоя протаивания была больше [40; 41]. В период «малого оледенения» 1550–1850 гг. средняя температура воздуха в этом районе была на 1°C меньше, чем в предыдущий период, и граница ММП сдвинулась к югу. При изменениях T особенно устойчивыми оказываются мерзлые грунты, находящиеся под слоем органических наносов и болотной растительности, в частности белого торфяного мха (сфагнума). Анализ данных о смещении южной границы распространения ММП в бассейне реки Маккензи по разным источникам показал, что она двигалась в соответствии с изменением T от города Форт-Норман ($\sim 64,5^\circ$ с. ш.) на юге до города Инувик ($\sim 68,2^\circ$ с. ш.) [11]. В верховье Маккензи в 1896–2011 гг. наблюдался устойчивый рост T [42] (рис. 6).

В то же время даже кратковременные изменения температуры воздуха приводят к локальной миграции границы ММП. Например, понижение T в 1940-х годах на 2°C сопровождалось движением границы распространения ММП в долине Маккензи к югу до $67,3^\circ$ с. ш. Быстрый рост T на арктическом побережье, отмеченный в [51], подтверждается данными об увеличении T в дельте Маккензи на побережье моря Бофорта (остров Ричардс) на $2,5^\circ\text{C}$ начиная с 1970 г. [55] (рис. 7).

Толщина сплошных мерзлых грунтов на территории устьевой области Маккензи изменяется в диапазоне 100–700 м. Рост T в этом районе в 1970–2008 гг. составил $1,5\text{--}2,5^\circ\text{C}$, глубина СТС увеличилась на 8 см за 1983–2008 гг. [51]. В 2005–2009 гг. зарегистрированный рост d в районе дельты Маккензи привел к увеличению времени замерзания оттаявшего грунта в аллювиальных низинах (101 день) вдвое по сравнению со временем замерзания возвышенных и не столь увлажненных областей [2].

Изменения температуры воздуха на Аляске в 1949–2016 гг. по данным [52] показывают наибольший рост в северном прибрежном районе вбли-

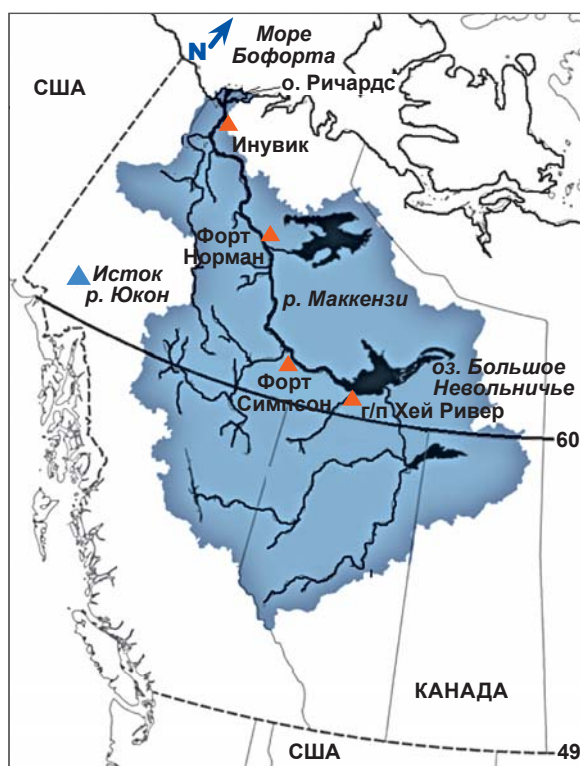


Рис. 7. Расположение бассейна реки Маккензи [14] и истока реки Юкон

Fig. 7. The watershed location of the Mackenzie River [14] and of the source of the Yukon River

зи устьев рек Колвилл и Сагаванирктон на $3,3^\circ\text{C}$. В среднем течении Юкона T повысилась на $2\text{--}2,5^\circ\text{C}$, а в низовье — до $1,5^\circ\text{C}$. На севере Аляски в 1900–1980 гг. T_g увеличилась на $2\text{--}4^\circ\text{C}$ [53]. В районе дельты Колвилла увеличение T_g' на глубине 1,2 м за 1999–2010 гг. составило $1,3^\circ\text{C}$ [39], в среднем течении реки рост T_g' составил всего $0,5^\circ\text{C}$. В результате увеличения T , T_g и T_g' выросла скорость эрозии берегов потока в дельте, однако река по-прежнему находится в зоне сплошных ММП, и сток наносов Колвилла согласуется с W_s для других рек зоны

ММП (см. табл. 1). Измерения глубины протаивания в верховьях (предгорья хребта Брукс) и в дельте реки Сагаваниркток за 2001—2011 гг. [34] показали, что с учетом просадки подстилающего СТС грунта высокой льдистости d в дельте увеличилась на 0,25 м, а в верховье — на 0,15 м. Существенно меньшее изменение d наблюдается без учета просадки грунта. Таким образом, обычное измерение глубины протаивания с помощью зондов может создать представление о стабильности или медленном изменении d , в то время как происходит проседание границы ММП. В южных районах бассейна Юкона за 1983—2003 гг. T_g' на глубине 20 м повысилась от 0,3°C до 1°C [54]. В районе поселка Руби Ривер на Юконе средняя скорость оттаивания реликтовых мерзлых грунтов составляла примерно 0,04 м/год до 2000 г., когда она увеличилась до 0,09 м/год.

Увеличение толщины активного слоя и разрушение мерзлых грунтов вплоть до исчезновения ММП может способствовать дренированию приповерхностного слоя грунта и, таким образом, осушению болот, прудов и озер. Усыхание термокарстовых озер и других водных объектов отмечается в различных районах в низинах Юкона на Аляске и в Сибири. Таяние верхнего слоя ММП приводит к чрезмерному увлажнению и нестабильности мерзлых грунтов и повышенной эрозии.

Территории в верхнем течении Маккензи (61°12'15" с. ш., 117°22'31" з. д.) и Юкона (59°10' с. ш., 133°50' з. д.) расположены в зоне спорадического распространения ММП (10—50%) под протяженными торфяными плато (см. рис. 2 и 7). Мерзлые грунты сохраняются в этих областях за счет тепловых свойств торфа. Скопление льда под торфяными плато привело к поднятию этих участков относительно окружающих областей и распространению на них более сухих и холодных почв [42]. В 1947—2008 гг. исследования ММП в этой области показали, что на экспериментальной площади 1 км² 38% мерзлых грунтов исчезло, что сопровождалось увлажнением и проседанием грунта, а также затоплением больших торфяных плато. Таяние ММП явилось результатом устойчивого тренда повышения T , зарегистрированного в этом районе (см. рис. 6).

Приведенный выше краткий обзор состояния ММП в России и Северной Америке показал, что в России деградация мерзлых грунтов происходит в основном в европейской части. При этом, несмотря на повышение T_g и увеличение d в ряде районов Сибири и Дальнего Востока, современные карты распространения ММП не показывают существенных сдвигов границы ММП в этих районах. В результате организации в Северной Америке дополнительных станций наблюдения за состоянием мерзлых грунтов в рамках Международного полярного года (ИПГ) появились новые данные о температуре грунта, показавшие, что T_g в горных районах верхнего и среднего течения Юкона выше, чем прогнозировалось по данным наблюдений климатических постов [42].

Существенная миграция границы ММП и усыхание озер, отмеченные в верховьях Маккензи и Юкона, приводят к формированию легкоразмываемого поверхностного слоя грунта. По-видимому, миграция границы ММП в этом районе — это одна из причин аномально большого стока наносов рек Юкона и Маккензи.

Связь стока наносов с длинами участков реки в мерзлых грунтах разных типов

Сток наносов и устойчивость к размыву берегов рек и проток устьев определяется свойствами грунта и климатическими факторами, причем большее влияние оказывает зимний сезон. Мерзлые грунты сплошного, прерывистого, островного распространения по-разному реагируют на повышение T . Параметр $k = (L - L_c)/L$ позволяет учесть влияние участков реки, находящихся в мерзлых грунтах разных типов. При $k = 0$ вся река течет в зоне ММП (рис. 8), и ее сток наносов относительно невелик. Чем больше участок реки вне зоны сплошных мерзлых грунтов и больше k , тем, казалось бы, должен быть больше сток наносов, при $k = 1$ вся река течет в прерывистых ММП и вне зоны ММП. 10 из рассматриваемых 20 рек (см. рис. 8, табл. 1) имеют параметр $k \neq 0$. Для рек с $k \neq 0$, текущих в разных типах мерзлых грунтов, зависимость относительного стока наносов $W_s / \langle W_s \rangle = f(k)$ можно представить полиномом четвертой степени с коэффициентом достоверности $R^2 = 0,72$. Величина среднего стока наносов $\langle W_s \rangle$ рассчитывается для рассматриваемого ряда рек. Линейная зависимость показывает неправдоподобную тенденцию к уменьшению W_s с уменьшением L_c . Полученный результат заставил исключить из ряда исследуемых рек Юкон и Маккензи на основе предположения, что они находятся в особых условиях из-за формирования легкоразмываемых грунтов в результате миграции границы ММП. Зависимость $W_s / \langle W_s \rangle = f(k)$ для рек с $k \neq 0$, исключая реки Юкон и Маккензи, представлена на рис. 9.

Показаны приближения $W_s / \langle W_s \rangle = f(k)$ полиномом третьей степени с использованием величин W_s для Енисея до и после строительства плотины и введения в строй Красноярской ГЭС (1972 г.), которые отличаются в два раза [20; 21]. Линейная зависимость, приведенная на рис. 9, показывает некоторую тенденцию к увеличению стока наносов с уменьшением участка реки, расположенного в сплошных мерзлых грунтах с незначительным коэффициентом достоверности.

Все оставшиеся реки текут по территории сплошных мерзлых грунтов разной мощности и льдистости. Для этих рек зависимости $W_s = f(F)$ и $W_s = f(W)$, представленные на рис. 10а и 10б, показывают, что сток наносов реки больше зависит от площади бассейна, чем от стока реки. Это подтверждается результатами корреляционного анализа: $r(W_s, F) = 0,8$, $r(W_s, W) = 0,6$. Коэффициент $r(W_s, F)$ попадает в диапазон величин, приведенный в [30].

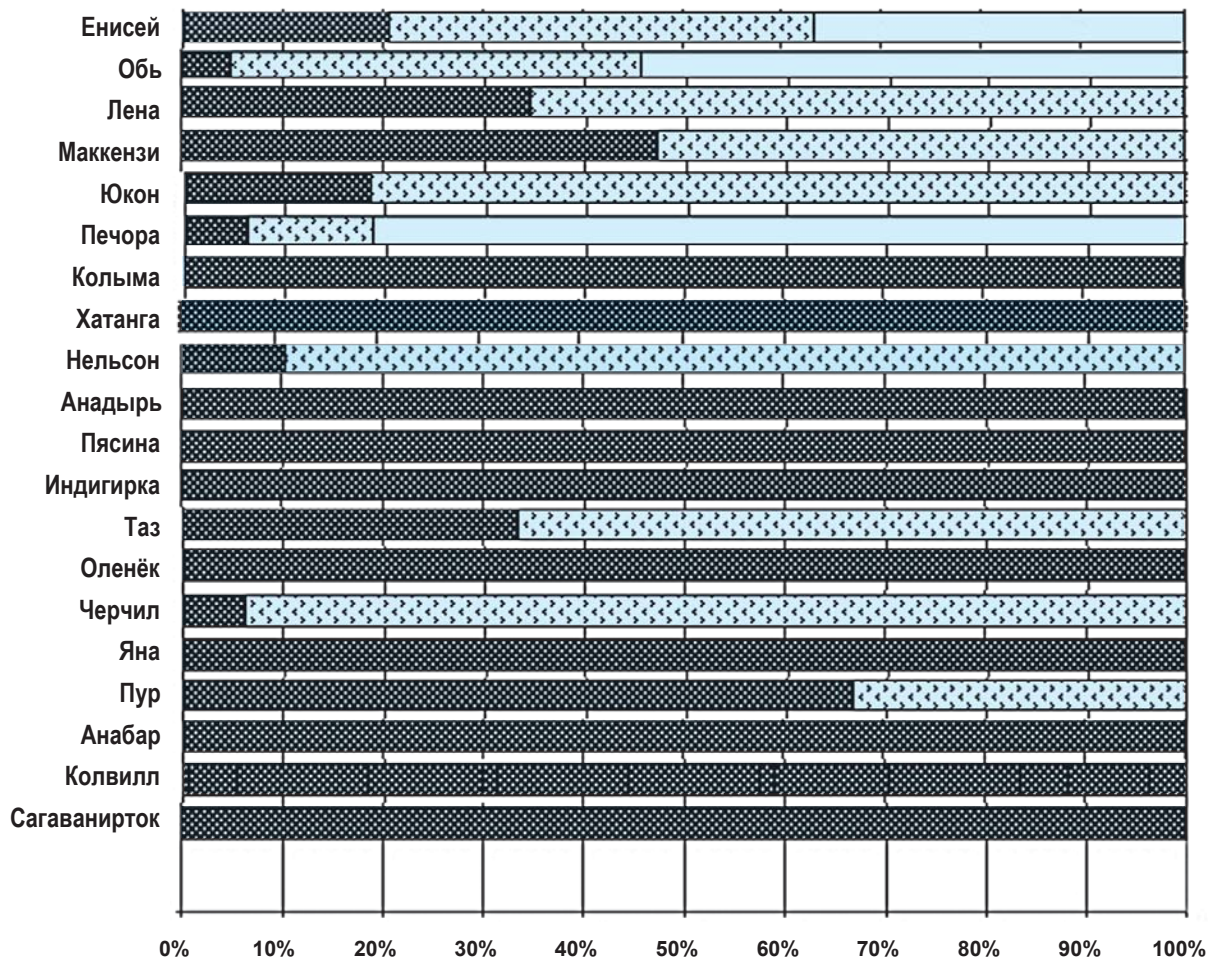


Рис. 8. Относительная длина участков рек, находящихся в мерзлых грунтах разных типов: темные – сплошные, галочки – прерывистые, без заливки – вне зоны ММП
 Fig. 8. The relative length of sections of rivers located in frozen soils of different types: dark – continuous, check marks – discontinuous permafrost, white – outside the permafrost zone

Научные исследования в Арктике

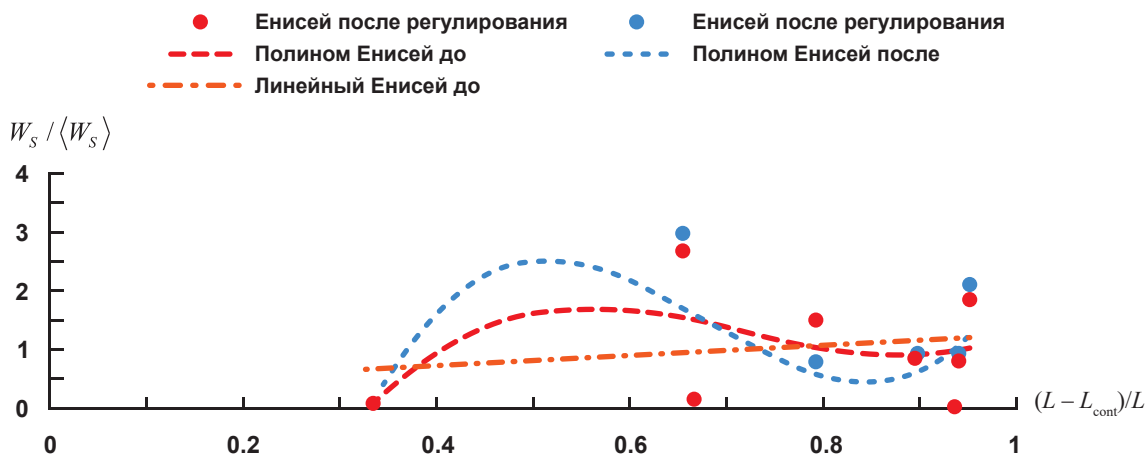


Рис. 9. Расчет зависимости относительного стока наносов $W_s / \langle W_s \rangle = f(k)$ для рек, текущих в разных типах мерзлых и немерзлых грунтов, исключая Юкон и Маккензи
 Fig. 9. Calculation of the relative sediment discharge dependence $W_s / \langle W_s \rangle = f(k)$ for rivers flowing in different types of permafrost and in not permafrost soils (excluding the Yukon and the Mackenzie)

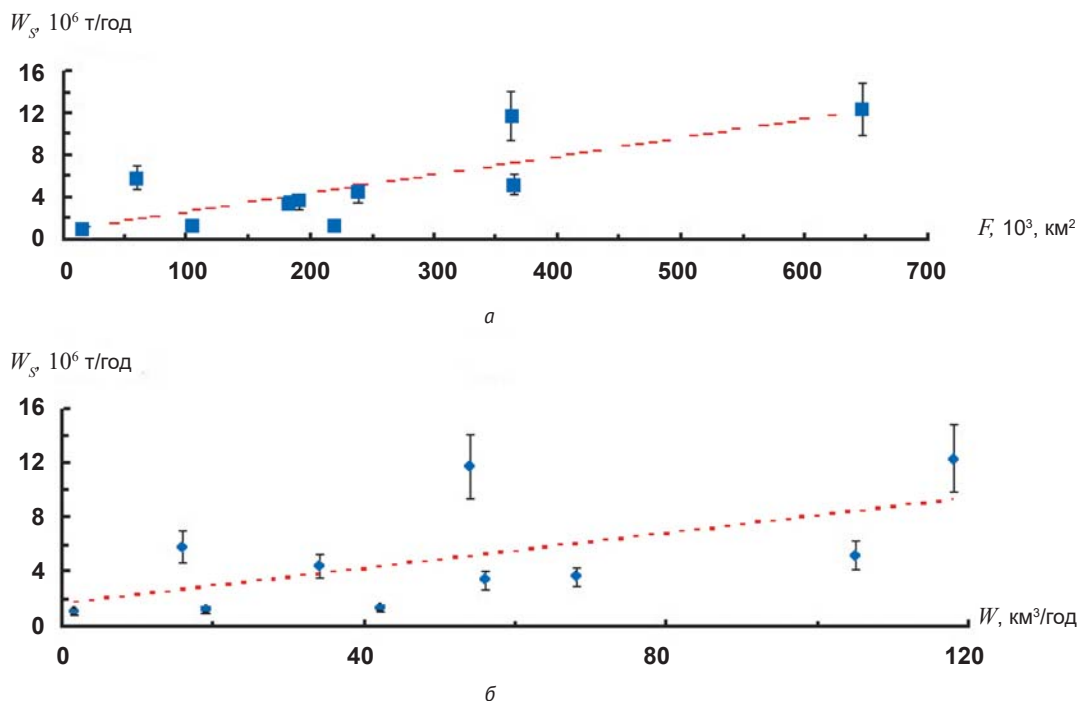


Рис. 10. Зависимость стока наносов рек, протекающих в сплошных мерзлых грунтах, от площади бассейна рек (а) и от стока воды (б); отклонение от среднего значения W_s (табл. 1) – 20%
 Fig. 10. Dependence of the sediment discharge of rivers, flowing in continuous permafrost, on the watershed area (a) and on the water flow (b), deviation from the mean value W_s (Table 1) – 20%

Проведенное исследование показало, что для рек криолитосферы параметр k дает некоторое представление о состоянии грунта. Увеличение k со временем у одной и той же реки может служить индикатором деградации мерзлых грунтов и возможного сдвига границы ММП к северу. Надо отметить, что дополнительный разброс данных может возникать из-за того, что этот параметр не учитывает свойства грунтов на разных участках территории бассейна реки. За рамками данной работы оказалось также исследование такого важного фактора, влияющего на сток наносов рек, как геологический состав пород, слагающих долины рек.

Выводы

1. Сток воды рек бассейна Северного Ледовитого океана растет с разной интенсивностью в отличие от рек вне зоны мерзлых грунтов, и прогнозируется его дальнейший рост до 2100 г.
2. Коэффициент корреляции величин стока воды и наносов позволяет предположить рост стока наносов рек криолитозоны.
3. Аномально большой для криолитозоны сток наносов рек Маккензи и Юкона не дает возможности получить устойчивые оценки зависимостей стока наносов от стока воды и площади водосбора для всего ряда из 20 рек.
4. Миграция границы распространения зоны ММП и изменение свойств мерзлых грунтов в кри-

олитозоне под влиянием изменений климата является одной из причин формирования легкоразмываемых грунтов и увеличения стока наносов рек этого района. Резкое увеличение стока наносов может служить индикатором состояния и мощности многолетнемерзлых пород в долинах и устьевых областях рек.

5. Предложенный параметр k , показывающий, какая часть реки протекает в сплошных мерзлых грунтах, позволяет разделить реки на две группы для анализа изменения их характеристик в условиях изменяющегося климата.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 16-05-00288, 16-08-00595.

Литература/References

1. Панин Г. Н., Дианский Н. А., Гусев А. В. и др. Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 2 (26). — С. 35—52. — DOI: 10.25283/2223-4594-2017-2-35-52.
- Panin G. N., Dianskii N. A., Gusev A. V. et al. Otsenka klimaticheskikh izmenenii v Arktike v XXI stoletii na osnove kombinirovannogo prognosticheskogo stsenariya. [Assessment of climatic changes in the Arctic in the 21st century based on the combined forecast]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2017, no. 2 (26), pp.

- 35—52. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-2-35-52. (In Russian).
2. Morse P. D., Burn C. R., Kokelj S. V. Influence of snow on near-surface ground temperatures in upland and alluvial environments of the outer Mackenzie Delta, Northwest Territories. *Canadian J. of Earth Sciences*, 2012, vol. 49, no. 8, pp. 895—913. DOI: 10.1139/e2012-002.
 3. Rennie C. D., Ahsan M. R., Laurent M. St. Sediment Transport in a Northern Regulated Semi-Alluvial River. Proc. 34th IAHR World Congress “Balance and Uncertainty”, Brisbane, Australia, 26.06—1.07, 2011, pp. 3737—3744.
 4. Walvoord M. A., Kurylyk B. L. Hydrologic Impacts of Thawing Permafrost — A Review. *Vadose Zone J.*, 2016, vol. 15, no. 6, 20 p. DOI: 10.2136/vzj2016.01.0010.
 5. Dolgopолова E. N. Climate changes impact on river mouths in permafrost zone in Russia. Proceedings of 20th IAHR International Symposium on Ice, June 14—17, 2010. Lahti, Finland, vol. I. pp. 1—12.
 6. Holmes R. M., Natali S., Goetz S. et al. Permafrost and Global Climate Change. Woods Hole Research Center. 2015, pp. 1—3.
 7. Walker H. J. Arctic Deltas. *J. of Coastal Research*, 1998, vol. 3, no. 14, pp. 718—738.
 8. Долгopолова E. H. Влияние мерзлых грунтов на сток наносов в устьях рек в криолитозоне // Тр. XXVI Междунар. конф. Евраз. науч. об-ния (ЕНО) «Актуальные вопросы развития науки в мире». — 2017. — Т. 26, № 4. — С. 185—189.
 - Dolgopолова E. N. Vliyanie merzlykh gruntov na stok nanosov v ust'yakh rek v kriolitozone. [The influence of frozen soils on runoff sediment at the mouths of rivers in the permafrost]. Tr. XXVI Mezhdunar. konf. Evraz. nauch. ob-niya (ENO) “Aktual'nye voprosy razvitiya nauki v mire”, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 185—189. (In Russian).
 9. Долгopолова E. H., Kotlyakov A. B. Многолетне-мерзлые породы в устьевых областях арктических рек России // Лед и снег. — 2011. — Т. 113, № 1. — С. 81—92.
 - Dolgopолова E. N., Kotlyakov A. V. Mnogoletnemerzlye породы v ust'evykh oblastiakh arkticheskikh rek Rossii. [Permafrost in estuarine areas of the Arctic rivers of Russia]. *Led i sneg*, 2011, vol. 113, no. 1, pp. 81—92. (In Russian).
 10. Hill P. R., Lewis C. P., Desmarais S. et al. The Mackenzie Delta: sedimentary processes and facies of a high-latitude, fine-grained delta. *Sedimentology*, 2001, vol. 48, pp. 1047—1078.
 11. Долгopолова E. H., Isupova M. B. Влияние многолетнемерзлых грунтов на гидролого-морфологические процессы в устьях рек Лена и Маккензи // Инженер. экология. — 2014. — № 4 (118). — С. 10—26.
 - Dolgopолова E. N., Isupova M. V. Vliyanie mnogoletnemerzlykh gruntov na gidrologo-morfologicheskie protsessy v ust'yakh rek Lena i Makkenzi. [Impact of permafrost on the hydrology and morphological processes at the river mouths of Lena and Mackenzie]. *Inzhener. ekologiya*, 2014, no. 4 (118), pp. 10—26. (In Russian).
 12. Beltaos S., Carter T., Prowse T. Morphology and genesis of deep scour holes in the Mackenzie Delta. *Can. J. Civil Engineering*, 2011, vol. 38, pp. 638—649. DOI: 10.1139/I11-034.
 13. Thorsteinson L. K., Becker P. R., Hale D. A. The Yukon delta. A synthesis of information. NTOAA/National Ocean Service, Ocean Assessments Division, Alaska Office. Anchorage, Alaska, 1989, 93 p.
 14. Rood S. B., Kaluthota S., Philipsen L. J. et al. Increasing discharge from the Mackenzie River system to the Arctic Ocean. *Hydrological Processes*, 2017, vol. 31, pp. 150—160. Available at: <https://doi.org/10.1002/hyp.10986>.
 15. Долгopолова E. H. Гидрологические процессы в дельте, расположенной в зоне многолетне-мерзлых пород // Тр. V Всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России», Владимир, 2016. — М.: Изд-во РГАУ-МСХА. — С. 270—277.
 - Dolgopолова E. N. Gidrologicheskie protsessy v del'te, raspolozhennoi v zone mnogoletnemerzlykh porod. [Hydrological processes in delta located in permafrost]. *Trudy V Vserossiiskoi konferentsii “Ledovye i termicheskie protsessy na vodnykh ob'ektakh Rossii”*, Vladimir, 2016. Moscow, Izd-vo RGAU-MSKhA, pp. 270—277. (In Russian).
 16. Brabets T. P., Wang B., Meade R. H. Environmental and Hydrologic Overview of the Yukon River Basin, Alaska and Canada. U.S. Geological Survey, 2000, Alaska, Denve, 106 p.
 17. Коротаев В. H., Бабич Д. Б. Специфика процессов дельтообразования в криолитозоне // Тр. III Всерос. конф. «Ледовые и термические процессы на водных объектах России». — Онега: Изд-во ИВП РАН, 2011. — С. 384—389.
 - Korotaev V. N., Babich D. B. Spetsifika protsessov del'toobrazovaniya v kriolitozone. [Characteristic features of delta formation in cryosphere]. Tr. III Vseros. konf. “Ledovye i termicheskie protsessy na vodnykh ob'ektakh Rossii”. Onega, Izd-vo IVP RAN, 2011, pp. 384—389. (In Russian).
 18. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России: Монография / Под ред. Д. В. Козлова. — М.: Изд-во РГАУ—МСХА, 2015. — 348 с.
 - Opasnye ledovye yavleniya na rekakh i vodokhranilishchakh Rossii. [Dangerous ice phenomena at rivers and reservoirs of Russia]. *Monografiya. Pod red. D. V. Kozlova*. Moscow, Izd-vo RGAU—MSKhA, 2015, 348 p. (In Russian).
 19. Magritsky D., Mikhailov V., Korotaev V. et al. Changes in hydrological regime and morphology of river deltas in the Russian Arctic. Proceedings of HP1, IAHS-IAPSO-IASPEL Assembly, 2013, Gothenburg, Sweden, IAHS Press, pp. 67—79.
 20. Долгopолова E. H. Закономерности движения вод и наносов в устье реки эстуарно-дельтово-

- го типа на примере р. Енисей // Вод. ресурсы. — 2015. — Т. 42, № 2. — С. 198—207. — DOI: 10.7868/S0321059615020054.
- Dolgoplova E. N.* Regularities in the motion of water and sediments at the mouth of river of estuarine-deltaic type: case study of the Yenisei River. *Water Resources*. 2015, vol. 42, no. 2, pp. 198—207. DOI: 10.1134/S0097807815020050.
21. Реки и озера мира: Энциклопедия. — М.: Энциклопедия, 2012. — 928 с.
- Reki i ozera mira. *Entsiklopediya*. [Rivers and Lakes of the World. *Encyclopedia*]. Moscow, *Entsiklopediya*, 2012, 928 p. (In Russian).
22. *Duboc Q., St-Onge G., Lajeunesse P.* Sediment records of the influence of river damming on the dynamics of the Nelson and Churchill Rivers, western Hudson Bay, Canada, during the last centuries. *The Holocene*, 2017, vol. 27 (5), pp. 712—725. DOI: 10.1177/0959683616670465.
23. *McCullough G.* Sediments, CDOM and nutrient flow in the Nelson–Hayes Estuary. *ArcticNet Report*, Manitoba Hydro & the operating funds of the Centre for Earth Observation Science. 2006, 28 p.
24. *Guay C. K., Falkner K. K.* A survey of dissolved barium in the estuaries of major Arctic rivers and adjacent seas. *Continental shelf research*, 1998, vol. 18 (8), pp. 858—882. DOI: 10.1016/S0278-4343(98)00023-5.
25. Атлас: морфодинамика устьевых систем крупных рек арктического побережья России / Геогр. факультет МГУ им. М. В. Ломоносова; Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова РАН. — М.: АПР, 2017. — 148 с. Atlas: morfodinamika ust'evykh sistem krupnykh rek arkticheskogo poberezh'ya Rossii. [ATLAS: morphodynamics of mouth systems of large rivers at Arctic coast of Russia]. *Geograficheskii fakul'tet MGU im. M. V. Lomonosova, Institut okeanologii im. P. P. Shirshova RAN*. Moscow, APR, 2017, 148 p. (In Russian).
26. *Hobel K. L.* The Sagavanirktok River, North Slope Alaska: Characterization of an Arctic Stream. Report 86—267 United States Department of the Interior Geological Survey. California, 1986, pp. 1—28. DOI: 10.3133/ofr86267.
27. *Аржакова С. К.* Зимний сток рек криолитозоны России: Монография. — СПб.: РГГМУ, 2001. — 209 с. *Arzhakova S. K.* Zimnii stok rek kriolitozony Rossii. *Monografiya*. [Winter runoff of the rivers of cryosphere in Russia. *Monograph*]. St. Petersburg, RGGMU, 2001, 209 p. (In Russian).
28. *Walker H. J., Hadden L.* Placing Colville river delta research on the internet in a digital library format. *Proceedings of Seventh International conference*. Yellowknife, Canada, 1998, pp. 1103—1107.
29. *Кравцова В. И., Мит'киных Н. С.* Устья рек России. Атлас космических снимков / Под ред. В. Н. Михайлова. — М.: Науч. мир, 2013. — 124 с. *Kravtsova V. I., Mit'kinykh N. S.* Ust'ya rek Rossii. Atlas kosmicheskikh snimkov. [River mouths of Russia. Atlas of space pictures]. Edited by V. N. Mikhaylov. Moscow, Nauch. mir, 2013, 124 p. (In Russian).
30. *Milliman J. D., Syvitski J. P. M.* Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers. *J. of Geology*, 1992, vol. 100, no. 5, pp. 525—544. Available at: <https://doi.org/10.1086/629606>.
31. *Field guide to rivers of North America*. Edited by A. C. Benke, C. E. Cushing. Elsevier Academic Press, 2010, 459 p.
32. *Scott K. M.* Effects of Permafrost on Stream Channel Behavior in Arctic Alaska. *Geological Survey professional paper 1068*. Washington, United States Government Printing Office, 1978, 19 p.
33. *Holmes R. R. Jr.* Measurement of Bedload Transport in Sand-Bed Rivers: A Look at Two Indirect Sampling Methods. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5091*. Rolla, Missouri, 2010, pp. 236—252.
34. *Shiklomanov N. I., Streletskiy D. A., Little J. D., Nelson F. E.* Isotropic thaw subsidence in undisturbed permafrost landscapes. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40 (24), pp. 6356—6361. DOI: 10.1002/2013GL058295.
35. *Белолипецкий В. М., Генова С. Н.* Вычислительный алгоритм для определения динамики взвешенных и донных наносов в речном русле // Вычисл. технологии. — 2004. — Т. 9, № 2. — С. 9—25. *Belolipetskii V. M., Genova S. N.* Vychislitel'nyi algoritm dlya opredeleniya dinamiki vzveshennykh i donnykh nanosov v rechnom rusle. [Algorithm for calculation of suspended and bed load sediment in a river bed]. *Vychisl. tekhnologii*, 2004, vol. 9, no. 2, pp. 9—25. (In Russian).
36. *Павлов А. В., Малкова Г. В.* Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на Севере России // Криосфера Земли. — 2009. — Т. 13, № 4. — С. 32—39. *Pavlov A. V., Malkova G. V.* Melkomashtabnoe kartografirovaniye trendov sovremennykh izmenenii temperatury gruntov na Severe Rossii. [Small-scale mapping of trends of the contemporary ground temperature changes in the Russian North]. *Kriosfera Zemli*, 2009, vol. 13, no. 4, pp. 32—39. (In Russian).
37. *Алексеев Г. В., Радионов В. Ф., Александров В. И. и др.* Климатические изменения в Арктике и северной полярной области // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2010. — Т. 84, № 1. — С. 67—80. *Alekseev G. V., Radionov V. F., Aleksandrov V. I. et al.* Klimaticheskie izmeneniya v Arktike i severnoi polyarnoi oblasti. [Climate change in the Arctic and the Northern Polar region]. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2010, vol. 84, no.1, pp. 67—80. (In Russian).
38. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / Под ред. С. М. Семенова. — М.: Росгидромет, 2012. — 508 с. *Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem*. [Methods of estimation of climate changes impact on physical and biological systems]. Edited by S. M. Semenov. Moscow, Rosgidromet, 2012, 508 p. (In Russian).

39. Payne C., Panda S., Prakash A. Remote Sensing of River Erosion on the Colville River, North Slope Alaska. *Remote Sensing*, 2018, 10, 397, pp. 1—20. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs10030397>.
40. Smith S. L., Burgess M. M. Mapping the response of permafrost in Canada to climate warming. *Geological Survey of Canada*, 1999, pp. 163—171.
41. Smith S. Trends in permafrost conditions and ecology in northern Canada. *Canadian Biodiversity: Ecosystem Status and Trends. Technical Thematic Report no. 9*. Ottawa, Canadian Councils of Resource Ministers, 2011, 27 p.
42. Coleman K. A. et al. Tracking the impacts of recent warming and thaw of permafrost peatlands on aquatic ecosystems: a multi-proxy approach using remote sensing and lake sediments. *Boreal Environmental Research*, 2015, vol. 20, pp. 363—377.
43. Déry S. J., Stadnyk T. A., MacDonald M. K., Gaulti-Sharma B. Recent trends and variability in river discharge across northern Canada. *Hydrology and Earth System Science*, 2016, vol. 20, pp. 4801—4818. DOI: 10.5194/hess-20-4801-2016.
44. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., Шикломанов А. И. и др. Новые данные о стоке крупнейших рек, впадающих в Северный Ледовитый океан // Полярная криосфера воды и суши. — М.; СПб.: Paulsen Ed., 2011. — С. 265—278.
- Shiklomanov I. A., Georgievskii V. Yu., Shiklomanov A. I. et al. Novye dannye o stoke krupneishikh rek, vpadayushchikh v Severnyi Ledovityi okean. [New data on the river flow of the large rivers flowing into Arctic Ocean]. *Polyarnaya kriosfera vody i sushi*. Moscow; St. Petersburg, Paulsen Ed., 2011, pp. 265—278. (In Russian).
45. Добровольский С. Г. Глобальная гидрология: Процессы и прогнозы. — М.: ГЕОС, 2017. — 526 с.
- Dobrovol'skii S. G. Global'naya gidrologiya. Protsessy i prognozy. [Global hydrology. Processes and forecasts]. Moscow, GEOS, 2017, 526 p. (In Russian).
46. Dolgoplova E. Sediment flow at the river mouths of the permafrost zone. *Proceedings of 10th International SedNet Conference "Sediments on the move"*, 14—17.06, 2017. Genoa, Italy.
47. Добровольский С. Г. Глобальные изменения речного стока. — М.: ГЕОС, 2011. — 660 с.
- Dobrovol'skii S. G. Global'nye izmeneniya rechnogo stoka. [Global changes of river flow]. Moscow, GEOS, 2011, 660 p. (In Russian).
48. Hansen J., Sato M., Ruedy R. et al. Global temperature 2017. Print 18.01.2018, pp. 1—5.
49. Оценочный отчет «Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования» / «Гринпис». — М.: ОМННО, 2010. — 43 с. — URL: <http://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/2009/11/4121202.pdf>.
- Otsenochnyi otchet "Osnovnye prirodnye i sotsial'no-ekonomicheskie posledstviya izmeneniya klimata v raionakh rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh porod: prognoz na osnove sinteza nablyudenii i modelirovaniya". "Gripis". [Report of Greenpeace of Russia "Main nature and socio-economic effects of climate change in permafrost zone: forecast on the basis of synthesis observations and modeling results"]. Moscow, OMNNO, 2010, 43 p. Available at: <http://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/2009/11/4121202.pdf>. (In Russian).
50. Павлов А. В. Мониторинг криолитозоны. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео». 2008. — 229 с.
- Pavlov A. V. Monitoring kriolitozony. [Permafrost monitoring]. Novosibirsk, Akad. izd-vo "Geo", 2008, 229 p. (In Russian).
51. Burn C. R., Kokelj S. V. The environmental and permafrost of the Mackenzie delta area. *Permafrost and periglacial processes*, 2009, vol. 20, pp. 83—105. DOI: 10.1002/ppp.655.
52. Wendler G., Gordon T., Stuefer M. On the Precipitation and Precipitation Change in Alaska. *Atmosphere*, 2017, vol. 253, no. 8, pp. 1—10. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos8120253>.
53. Alaska's Thawing Permafrost. USGS–NASA. Available at: <http://landsat.gsfc.nasa.gov>.
54. Wilson N. J., Walter M. T., Waterhouse J. Indigenous knowledge of hydrologic change in the Yukon River basin: a case study of Ruby, Alaska. *ARCTIC*, 2015, vol. 68, no. 1, pp. 93—106. DOI: 10.14430/arctic4459.

Информация об авторе

Долгополова Елена Николаевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория динамики русловых потоков и ледотермики, Институт водных проблем РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: dolgopolova@gmail.com.

Библиографическое описание данной статьи

Долгополова Е. Н. Роль многолетнемерзлых пород в формировании гидролого-морфологического режима устьев рек водосбора Северного Ледовитого океана // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 4 (32). — С. 70—85. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-70-85.

THE ROLE OF PERMAFROST IN THE FORMATION OF THE HYDROLOGICAL AND MORPHOLOGICAL REGIME OF RIVER MOUTHS IN THE ARCTIC OCEAN WATERSHED AREA

Dolgoplova E. N.

Water Problems Institute RAS (Moscow, Russian Federation)

The article was received on July 24, 2018

Abstract

The paper presents an analysis of hydrologic characteristics of 20 rivers flowing in permafrost zone. All river mouths under consideration are located in continuous permafrost. It is revealed that annual sediment discharge of the Mackenzie and Yukon rivers is several times greater than the ones of the rest of the permafrost zone rivers. The correlation coefficient between water flow and sediment of the rivers, excluding the Yukon and the Mackenzie, is approximately 0.8. The observed steady increase in the water flow in the in permafrost zone rivers in the last 50 years suggests a growth in the sediment flow in the river mouths of the area. To clarify the cause of the abnormally large sediment discharge of the Yukon and the Mackenzie, a brief review of climate change studies in the circumpolar region is provided. Changes in air temperature and soil are given. To assess the changes in the properties of frozen soils and the possible migration of the southern boundary of the permafrost to the north, data are given on the change in the depth of seasonal thawing of soil in the permafrost zone. The migration of the southern boundary of the permafrost soils distribution and its role in the formation of easily eroded soils on the catchment surface are discussed. A comparative analysis of the section lengths of rivers located in permafrost zones of various types is carried out to determine their impact on the sediment discharge in the Arctic river mouths.

Keywords: *river mouths, Arctic Ocean, hydrologic regime, permafrost soils, climate changes.*

The investigation was supported by Russian Foundation for Basic Research, projects no. 16-05-00288, 16-08-00595.

Information about the author

Dolgoplova Elena Nikolaevna, PhD, Senior Research Scientist, Laboratory of Channel Flows and Ice-thermic Processes, Water Problems Institute RAS (3, Gubkina str., Moscow, Russia, 119333), e-mail: dolgoplova@gmail.com.

Bibliographic description

Dolgoplova E. N. The role of permafrost in the formation of the hydrological and morphological regime of river mouths in the Arctic Ocean watershed area. *Arctic: ecology and economy*, 2018, no. 4 (32), pp. 55—70. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-70-85. (In Russian).

© Dolgoplova E. N., 2018