

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2024.1.2>

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ВОДЫ В СУБАРКТИЧЕСКИХ ДЕЛЬТАХ

Научная статья

Долгополова Е.Н.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0003-4348-8723;

¹ Институт водных проблем РАН, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (dolgopolova[at]gmail.com)

Аннотация

Исследуется гидрологический режим субарктических дельт: сток воды, осадки, длительность подледного периода и толщина ледового покрова и их изменения. Осадки на территории бассейнов выше вершин дельт рек в XXI в. увеличиваются. Отмечена зависимость длительности подледного периода и толщины льда от географической широты местности. Обсуждаются изменения ледового режима субарктических устьев рек под влиянием изменения климата. Исследования самой южной субарктической дельты Юкона показали, что преобладающей причиной наводнений становятся штормовые нагоны. При продолжающемся росте средней температуры воздуха роль ледовых заторов в возникновении наводнений и в других реках будет становиться меньше. Приводится аналитический обзор данных об оттаивании грунта и росте глубины сезонно-талого слоя в зоне многолетнемерзлых пород в условиях изменения климата. Обсуждается возможность прогнозирования возникновения опасных явлений в субарктических дельтах.

Ключевые слова: субарктические дельты, климат, расход воды, осадки, ледовые явления, мерзлота.

INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON CONDITIONS OF WATER DISCHARGE FORMATION IN SUBARCTIC DELTAS

Research article

Dolgopolova E.N.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0003-4348-8723;

¹ Water Problems Institute RAS, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (dolgopolova[at]gmail.com)

Abstract

The hydrological regime of subarctic deltas is studied: water discharge, precipitation, duration of the subglacial period and ice cover thickness and their changes. Precipitation in the territory of the basins above the tops of river deltas in the XXI century is increasing. The dependence of the sub-ice period duration and ice thickness on the geographical latitude of the area is noted. Changes in the ice regime of subarctic estuaries under the influence of climate change are discussed. Studies of the southernmost subarctic Yukon delta have shown that storm surges are the predominant cause of flooding. As average air temperatures continue to rise, the role of ice blockings in causing flooding in other rivers will become less important. An analytical review of data on ground thawing and growth of the seasonally thawed layer depth in the permafrost zone under climate change conditions is given. The possibility of predicting the occurrence of hazardous events in subarctic deltas is discussed.

Keywords: subarctic deltas, climate, water discharge, precipitation, ice phenomena, permafrost.

Введение

Устья рек – это пограничные объекты, на режиме которых отражаются все процессы, происходящие на суше и в океане. Современные изменения климата вызывают изменения гидрологического режима дельт рек на побережье Северного Ледовитого океана. Устойчивый тренд повышения температуры воздуха и активное освоение территорий устьев и Арктического шельфа способствуют развитию процессов, свойственных только этой области, большая часть которой находится в зоне многолетнемерзлых пород (ММП). Например, практически весь бассейн р. Индигирка, включая дельту, относится к зоне сплошного распространения ММП. Мощность криолитозоны в бассейне реки составляет около 300–400 м при температуре пород на глубине 15–30 м от -3°C до -7°C [7].

Лед, находящийся в составе грунта арктических устьев рек, покрывающий речные потоки и устьевое взморье большую часть года, очень чувствителен к изменениям среднегодовой температуры воздуха T . В арктическом и субарктическом поясах Северной Америки и России в 2017 г. наблюдалось максимальное повышение $T \sim 2-3^{\circ}\text{C}$ по сравнению с осредненной за 1880–1920 гг. [27]. Например, на территории дельт Печоры и Колымы тренд T за 1976–2018 гг. составил $1.2-1.4^{\circ}\text{C}/10$ лет [13]. Вследствие роста T увеличивается глубина сезонного оттаивания грунта [25], [31], приводящая к изменению ландшафта дельты. Толщина ледяного припая у берегов Арктики становится меньше, и площадь его распространения уменьшалась в 1976–2007 гг. со скоростью $12300 \text{ км}^2 \text{ год}^{-1}$ ($0.7\% \text{ год}^{-1}$) [37]. Изменение движения морских льдов на Арктических устьевых взморьях, рост уровня моря на протяжении XX века и увеличение просадки грунта в дельтах приводят к затоплениям прибрежных территорий и вызывают деградацию мерзлоты на территории арктических дельт. Наводнения, возникающие в периоды замерзания и вскрытия реки, в результате дождевых паводков и при штормовых нагонах [8], [15], оказывают тепляющее действие на дельтовые равнины с

малым уклоном и приводят к дополнительному оттаиванию. Оценка риска затопления территорий и ущерб от него показывает, что в больших субарктических дельтах (Юкон, Маккензи, Лена) этот риск мал по сравнению с густонаселенными дельтами (Кришна, Ганг, Годавари) [42]. Это происходит в результате малого значения коэффициента, учитывающего население субарктической дельты, и полного игнорирования процесса оттаивания мерзлоты, приводящего к быстрому изменению гидрологического режима дельт в зоне ММП.

Параметры гидрологического и ледового режимов субарктических дельт являются интегральными характеристиками процессов, происходящих на территории водосборов рек и на устьевом взморье дельт. Цель работы – определение и анализ характеристик гидрологического режима в вершинах дельт (ВД) в зоне ММП для оценки тенденций развития разных процессов, в том числе опасных, в субарктических дельтах.

Объекты и данные

Рассматриваются устья рек на побережье Северного ледовитого океана (табл. 1, 2). Используется статистический метод оценки изменения величины среднегодового расхода воды Q рек. Рассчитывается среднееголетний расход воды $\langle Q \rangle$, его линейный тренд и скорость изменения DQ/Q на гидрологических постах (г/п), ближайших к вершинам дельт (ВД) восьми рек Печора, Лена, Яна, Индигирка, Колыма, Маккензи, Колвилл и Юкон по данным источников [32], [34], [40], [43]. Скорость изменения Q используется в качестве интегрального индикатора тенденций процессов, происходящих в бассейне реки. Величины DQ/Q сравниваются со среднегодовыми суммами осадков P в дельтах. Климатические значения P приводятся по данным [10], [18], [26], [36]. Скорость изменения сумм осадков P на ближайших к дельтам метеорологических станциях (м/с) некоторых Российских рек рассчитывается по данным [14]. Приводится обзор имеющихся данных о ледовых явлениях и средняя толщина льда. Проводится анализ и сравнение этих величин для разных устьев при изменениях климата.

Рост T на побережье Северного Ледовитого океана, приводит к повышению температуры поверхности земли T_g , увеличению толщины слоя сезонного протаивания d и смещению к северу границы распространения сплошных мерзлых грунтов. Приводится краткий аналитический обзор изменений величин T_g и d по данным [16], [23], [31], [35]. Циклические изменения климата вызывают периодические колебания d на территории зоны ММП и формирование легкоразмываемых грунтов в зоне миграции границы распространения ММП, что вызывает изменение стока наносов в дельте криолитозоны.

Обсуждение результатов

Расход воды. Во всех устьях из Табл. 1 наблюдается рост расхода воды с разной скоростью. Оценка $DQ/\langle Q \rangle$ зависит от длины ряда наблюдений, что можно проиллюстрировать на примере рек Яна и Индигирка (рис. 1). Величины $\langle Q \rangle$ для рек Лена, Печора, Колыма, Маккензи и Колвилл рассчитаны в работах [4], [5], [25]. Скорость изменения Q в дельте Яны возможно завышена из-за недостаточной длины ряда наблюдений.

Таблица 1 - Устья рек, расположенные в зависимости от широты ВД, начиная с самой северной

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2024.1.2.1>

№	Река	Сев. широта	$\langle Q \rangle$, м ³ /с	$DQ/\langle Q \rangle$, %	P , мм/год	$DP/\langle P \rangle$ %, м/с
1	Лена	72°24'43"	17200	0,19	300	-
2	Яна	71°32'14"	1063	0,56¹	200	-
3	Колвилл	70°53'02"	624	0,98¹	150	-
4	Индигирка	70°37'04"	1603	0,18	200	0,16 – Усть-Мома, 0,22 – Оймякон
5	Колыма	69°33'05"	3320	0,29 0,92¹	300	0,42 – Черский
6	Маккензи	68°56'23"	9260	0,21	300	-
7	Печора	68°18'27"	4234	0,20 1,16¹	600	0,37 – Печора, 0,48 – Нарьян-Мар
8	Юкон	61°56'04"	6557	0,36	400	-

Примечание: характеристики рек: среднееголетний расход воды в ВД $\langle Q \rangle$ и скорость изменения Q ($DQ/\langle Q \rangle$); средняя сумма осадков для климатического пояса в год P и скорость роста $DP/\langle P \rangle$ на некоторых м/с в Сибири; ¹ – короткие ряды, захватывающие период в XXI в

Таблица 2 - Периоды изменения Q и P и г/п для рек из таблицы 1 при расчетах

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2024.1.2.2>

№	Река	Период <Q>, годы	Период <P>, годы
1	Лена	1936 – 2008 (2011) Кюсюр	2004 – 2021
2	Яна	1972 – 2007 Юбилейная	2004 – 2021
3	Колвилл	2003 – 2019 Умиат	1971 – 2000
4	Индибирка	1937 – 1998 Воронцово	1967 – 2022 Усть- Мома 1967 – 2022 Оймьякон
5	Колыма	1978 – 2019 Колымское 2003 – 2019	1966 – 2018 Черский [4]
6	Маккензи	1973 – 2011 Арктик Рэд Ривер	м/п Инувик 1991 – 2000 P = 250 мм/год
7	Печора	1932 – 2005 Оксино 2000 – 2018	1966 – 2018 Печора [4] 1966 – 2018 Нарьян- Мар [4]
8	Юкон	1976 – 2023 Пайлот-Стэйшн	1971 – 2000, [36]

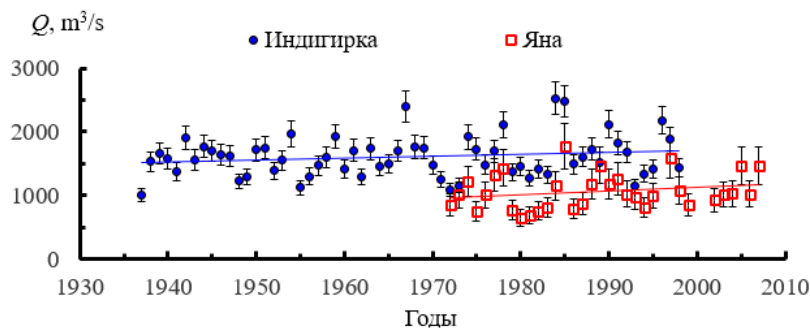


Рисунок 1 - Изменение Q на г/п Воронцово, р. Индибирка (1937–1998 гг.), и Юбилейная, р. Яна (1972–2007 гг.) с10% и 20% соответственно

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2024.1.2.3>

Ряд наблюдений Q в дельте Колвилла (г/п Умиат, 145 км выше ВД) также короткий и охватывает период 2003-2019 гг., с использованием восстановленных данных за 2003-2007 гг., представленных в [33]. Расчет $DQ/\langle Q \rangle$ для коротких рядов в дельтах рек Печора и Колыма в начале XXI в. дает соответственно: Печора – 1.16% (2000-2018) и Колыма – 0.92% (2003–2019). Растущие величины речного стока и атмосферных осадков составляют приходную часть баланса субарктических дельт.

Осадки. Устойчивый рост T приводит к увеличению увлажненности субарктического региона за счет роста глубины протаивания почвы, грунтового питания, таяния наледей и изменения режима осадков. Исследования многолетних изменений P в бассейнах рек Печора и Колыма показали рост годовых сумм осадков на ближайших к дельтам постах в период 2008–2019 гг. [4] (табл. 1). По данным [2] многолетние изменения P в Арктике в 1936–2009 гг., осредненные по широтной зоне 60-70° с.ш., также дают увеличение P на 8% относительно нормы осадков за 1961–1990 гг., причем годовой прирост обеспечивается увеличением P в период октябрь-май.

Исследование многолетних трендов P в бассейне р. Индибирки по данным [14] в 1967-2022 показало рост осадков на м/п Усть-Мома в 1119 км от устья (рис. 2) и Оймьякон (верховье) и уменьшение P в дельте рек на м/п Чокурдах в 187 км от устья. Возможно уменьшение осадков при приближении к устьевому взморью объясняется движением воздушных масс над океаном, так как такое же уменьшение P зарегистрировано в бух. Амбарчик на устьевом взморье Колымы, где на м/с Амбарчик в 2008-2019 гг. наблюдалось уменьшение P на (0.98%/год) [4].

Сравнение значений $DQ/\langle Q \rangle$ в ВД и $\langle P \rangle$ на ближайших к дельтам м/п показывает (рис. 3), что разница осадков в дельтах рек не единственная причина влияющая скорость изменения стока воды. В наиболее южной дельте Юкона, где среднее количество осадков невелико, скорость роста Q более чем в 2 раза превосходит $DQ/\langle Q \rangle$ всех других дельт, включая дельту Печоры.

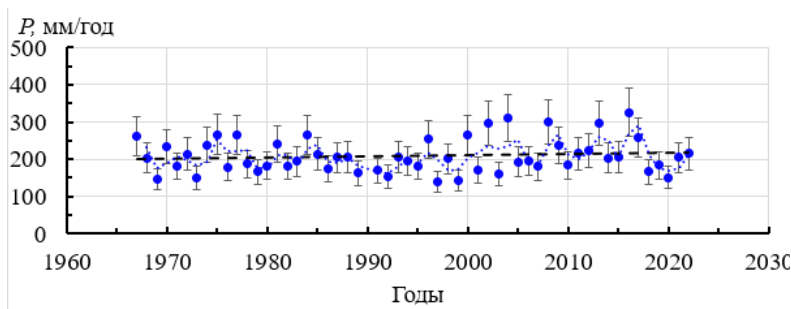


Рисунок 2 - Изменение P на м/п Усть-Мома, р. Индигирка, 1967–2022 гг.
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2024.1.2.4>

Ледовый режим рек. Рост температуры воздуха и осадков в зоне ММП приводит к изменению ледового режима рек. По данным [3], [15], [22] максимальная толщина льда и продолжительность ледостава уменьшаются в XXI в. по сравнению с периодом от начала наблюдений до 1979 г. Средняя продолжительность подледного периода исследуемых рек t составляет 190-250 дней в году, толщина льда d изменяется от 1.4 до 2.4 м (рис. 4). Длительность ледостава и толщина льда в среднем уменьшаются с уменьшением географической широты, на которой расположены ВД.

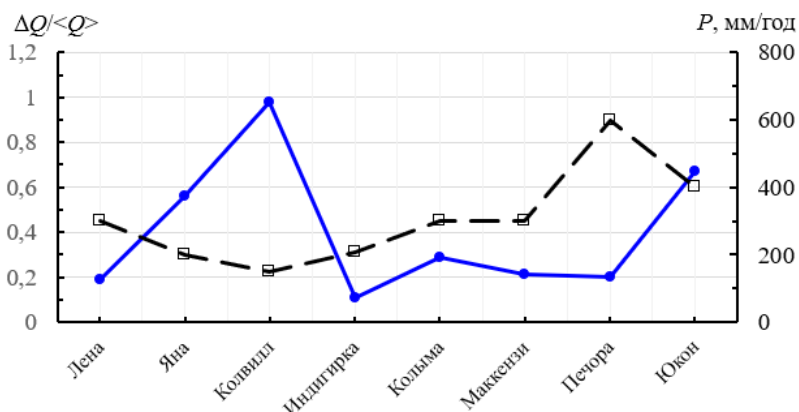


Рисунок 3 - Скорость изменения Q (1) в зависимости от среднегодовых величин сумм осадков $\langle P \rangle$ (2) в дельтах рек из Таблицы 1
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2024.1.2.5>

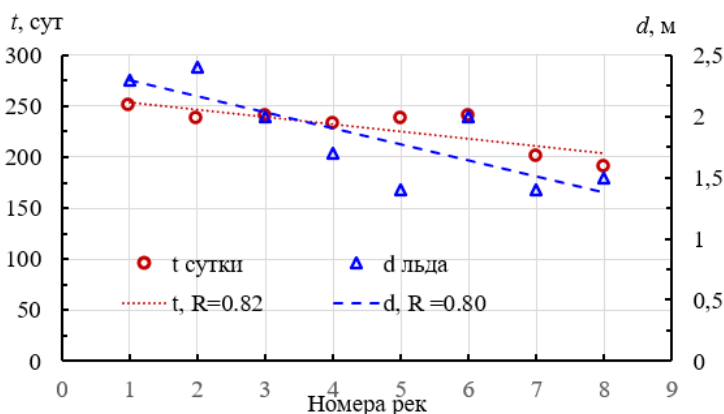


Рисунок 4 - Изменение длительности ледостава t и толщины льда d в дельтах рек из Таблицы 1 в зависимости от широты ВД
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2024.1.2.6>

Арктические дельты мало населены и труднодоступны и ряды регулярных наблюдений за ледовым режимом в том числе образованием ледяных заторов и заторными уровнями воды очень коротки или отсутствуют, исключая экстремальные случаи. Образование льда на Российских реках начинается в дельтах с конца сентября – начала октября (Индибирка) до начала ноября (Печора), и смещается к верховью с некоторым запаздыванием в сроках появления льда по длине реки. По данным [12] осенний ледоход с образованием шуги проходит в течение 3-4 дней и, как правило, без роста уровня до критических отметок на исследуемых реках. Например, на г/п Воронцово р. Индибирки, находящемся на расстоянии 350 км от устья, в период 1937-1989 гг. зарегистрировано 3 зазора [7], не приведшие к заметному росту уровня воды в дельте.

При вскрытии рек, текущих с юга на север в субарктической зоне, возникают условия для образования заторов, приводящих к подъемам уровня воды и затоплению прилегающей территории (Табл. 3). Вскрытие рукавов дельты *Печоры* начинается в конце мая и с вероятностью 33% сопровождается заторными наводнениями в период 1912–2015 гг. [8].

Одно из опасных наводнений в результате ледяного затора произошло в 1998 г., когда средний уровень воды ниже ВД был превышен на ~5 м, и были затоплены улицы Нарьян-Мара [6]. В дельте *Лены* вблизи ее вершины (о. Тит-Ары) часто образующиеся ледяные заторы вызывают подъем уровня воды, распространяющийся вверх по течению на большие расстояния (до сотен километров) и длящийся до 10 суток [5]. В дельтах *Яны* и *Колымы* заторные наводнения происходят практически ежегодно с подъемом уровня воды на 10-13 м [11]. Весенний ледоход в дельте *Индибирки* начинается в конце мая-начале июня и продолжается в среднем 4-5 суток. При частых заторах льда уровень воды поднимается до 3 м [9]. На г/п Воронцово повторяемость заторообразования составляет 12–27%, на г/п Чокурдах – 36%. Ледяной затор может длиться 5 суток и более.

Таблица 3 - Периоды повышения уровня воды, частота образования ледяных заторов и их вклад в повышение уровня воды в дельтах сибирских рек

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2024.1.2.7>

Дельта реки	Причина повышения уровня воды	Период времени	Вклад ледяных заторов, %
Печора	Половодье снеговое, весеннее	15.05 – 15.06	30–70
Лена	Половодье снеговое, весенне-летнее	1.06 – 15.06	80–100
Яна	Половодье снеговое, весна-лето, летне-осенние дожди	Июнь – август	50–100
Индибирка, г/п: Воронцово Чокурдах	Половодье снеговое, весна-лето, ледяные заторы	Июнь	12 – 27 36
Колыма	Половодье снеговое, весенне-летнее	1.06 – 15.06	40–70

Примечание: источники: [1], [9]

Вскрытие рукавов дельты *Маккензи* начинается одновременно в конце мая – начале июня и сопровождается заторами льда в ВД, ростом уровня воды и затоплением большей части дельты [20]. Несмотря на потоки воды, несущие обломки льда вдоль Среднего и других рукавов дельты, льдины никогда не выносятся за пределы верхней дельты. Максимальная $d \leq 1.3$ м в ВД средняя за 1996–2008 гг. наблюдалась в конце апреля – середине мая.

В дельте *Колвилла* ледяные заторы часто возникают на спаде половодья благодаря таянию огромных льдин, застрявших на мелководьях и устьевых барах [44]. По данным разных авторов из [19], за 1962–1995 гг. для рукавов дельты грубая оценка дает [25]: дату очищения от льда в конце периода на ~5 дней раньше, а максимальный уровень воды достигается на ~15 дней позже. Задержку пика половодья можно объяснить изменением режима таяния ледников и режима осадков в верховьях притоков реки.

На р. *Юкон*, как и на других рассматриваемых реках, таяние снега и льда начинается с верховьев реки. Нерегулярные наблюдения за вскрытием реки на г/п Пайлот-Стэйшн начались в 1924 г. [43] (рис. 5). По имеющимся данным вскрытие реки на заключающем г/п в настоящее время происходит в среднем 13 мая, что на 6 дней раньше, чем в начале XX в. В ~30 км ниже г/п Пайлот-Стейшн с 1950 до 2007 г. T зимой выросла – 40 до -25°C , а d уменьшилась с ~2 м до 1 м [28]. В настоящее время вскрытие рукавов дельты *Юкон* проходит почти незаметно без звука взломанного льда, что подтверждает выводы [22].

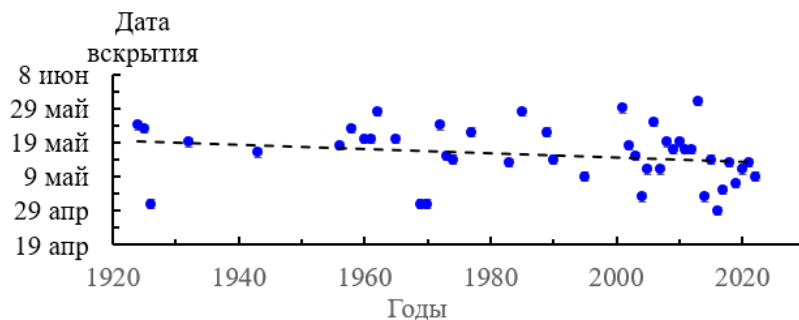


Рисунок 5 - Даты вскрытия р. Юкон на г/п Пайлот-Стэйшн
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2024.1.2.8>

В юго-западной части дельты (с. Эммонак, Алаканук) регулярно возникавшие заторы льда при вскрытии потоков в рукавах стали реже, часто лед тает на месте и уровень воды не превышает критических отметок. В период 1984–2006 гг. зарегистрировано 13 наводнений [29], 10 из которых происходили в результате ледяных заторов. За весь период наблюдений 1964–2020 гг. в северной части дельты Юкона (с. Котлик) [24] отмечено 33 наводнения, 2 из которых происходили весной. Все остальные наводнения происходили летом и осенью в результате штормовых нагонов.

Подледный период у рукавов дельт становится более коротким (рис. 6), что в свою очередь влияет на влагообмен потоков с атмосферой. Уменьшение длительности подледного периода, отмеченные разными авторами в XXI в. [5], [19], [22], [30] вносят вклад во взаимодействие устьев рукавов с морским волнением и штормовыми нагонами, высота и частота которых зависит от положения границы распространения многолетних морских льдов. Влияние изменения климата на ледовые условия в дельтах заключается в более раннем вскрытии рукавов и постепенном уменьшении толщины льда, покрывающего рукава дельт. Более тонкий ледяной покров и большая T приводят к более частым «тепловым» вскрытиям вместо «динамических» [22].

Оттаивание ММП Сравнение изменения величин T_g и d на побережье Северного ледовитого океана России показывает, что в районе устьев Оби, Лены, Колымы, Анадыря рост T_g приводит к увеличению глубины протаивания [25]. Обнаруженное в дельтах Печоры и Колымы уменьшение зимних осадков, осредненных по площади водосбора [4], способствует более раннему началу весеннего половодья и снижению пиковых значений Q [31], [41], а также способствует более быстрому освобождению территории от снега и оттаиванию грунта, что приводит к увеличению глубины активного слоя.

Рост T_g в дельте р. Маккензи в период 1970–2008 гг. составил 1.5–2.5°C, d увеличилась на 8 см за 1983–2008 гг. [33]. 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 [35].

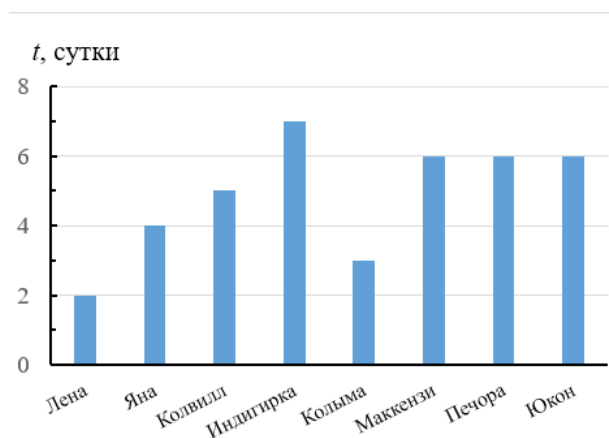


Рисунок 6 - Уменьшение длительности подледного периода t на реках
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2024.1.2.9>

Исследования T_g мерзлых пород на севере Аляски в период 1900–1980 гг. показали ее увеличение на 2–4°C [16]. На севере Аляски вблизи дельты р. Колвилл увеличение температуры грунта на глубине 1.2 м за 1999–2010 гг. составило более 1°C [38]. Исследование изменений температуры грунта на глубине 80 см на 22 станциях в бассейнах рек Яна и Индигирка [31] показало ее устойчивый рост на 0.03°C/год в период 1966–2015 гг. Таким образом, оттаивание мерзлых пород на территории бассейнов рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, вносит некоторый вклад в увеличение стока рек, приводит к изменению свойств грунта и размывам берегов. Катастрофические ямы размыва наблюдаются в рукавах дельты Маккензи, до 30 м глубиной, и их число выросло до 18 в 2004 г. [21]. Их появление представляет

опасность для проходящего под рукавами дельты трубопровода, однако прогнозировать локализацию размывов пока не удается.

Просадка грунта определяется его способностью оседать под действием собственного веса или внешней нагрузки при повышении влажности. Просадкам подвержены мелкодисперсные грунты, в частности молодые и рыхлые дельтовые отложения. Разработанные методы с применением спутниковых данных дают среднюю оценку диапазона скорости просадки грунта в полигональной тундре арктических дельт 2–7 мм/год по рядам <10 лет, которая может возрастать до 30 мм/год [17]. Однозначная связь между глубиной активного слоя и реки пока не установлена. Исследования показали, что скорость изменения глубины активного слоя и просадки грунта сильно зависит от свойств почвы и содержания льда в почве, и от свойств и толщины снежного покрова. Для моделирования и прогноза увеличения глубины активного слоя выбираются участки однородной полигональной тундры [31], [39] при неизвестной зависимости льдистости грунта от глубины. С ростом T активизируется образование поверхностных таликов, которые вызывают термокарстовые провалы грунта, не поддающиеся прогнозированию.

Заключение

Основной вывод работы заключается в том, что влияние таяния ММП в бассейнах и устьях рек представляет важное дополнительное условие при прогнозировании изменений гидролого-морфологического режима дельт арктического и субарктического поясов в условиях роста температуры воздуха. Предпринятое исследование позволяет сделать следующие выводы: (1) Расходы воды в дельтах рек в зоне ММП растут, при этом длительность ледовых явлений и толщина льда на рукавах дельт в XXI-ом веке убывает. (2) Изменение режима осадков на территории бассейнов рек приводит к росту осадков в XXI-ом веке, что вносит положительный вклад в водный баланс дельт. (3) В настоящее время в дельте Юкона, самой южной из рассмотренных, наводнения, вызванные ледяными заторами, незначительны по сравнению с нагонными наводнениями, зависящими от распространения многолетних морских льдов вблизи устьевого взморья. (4) Данные о вскрытии северных дельт при сравнении с дельтой Юкона позволяют предположить, что при прогнозируемом росте T частота заторных наводнений будет уменьшаться, а штормовых нагонов расти. (5) Таяние льда в грунте зоны ММП и рост толщины активного слоя в бассейнах рек увеличивает величину поверхностного стока с водосбора.

Расчеты и аналитический обзор сделаны автором. При обновлении используемых баз данных в анализе участвуют обновленные расчеты.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was carried out within the framework of topic No. FMWZ-2022-0001 of the State Assignment of the WPI RAS.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Агафонова С.А. Наводнения на реках и побережьях арктической зоны России / С.А. Агафонова, Д.В. Магрицкий, Ф.А. Романенко [и др.] // Труды Всероссийской научной конференции с международным участием «Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения». Нижний Новгород, 08-14 сентября 2019 г. // Редкол.: О.П. Авандеева [и др.] — М.: Студия Ф1, 2019. — 572 с.
2. Алексеев Г.В. Климатические изменения в Арктике и северной полярной области / Г.В. Алексеев, В.Ф. Радионов, Е.И. Александров [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2010. — Т. 84. — № 1. — С. 67–80.
3. Вуглинский В.С. Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях / В.С. Вуглинский // Вестник С.-Петербургского университета Сер. 7. — 2014. — № 3. — С. 32–45.
4. Долгополова Е.Н. Современные изменения основных составляющих водного баланса дельт Печоры и Колымы в условиях потепления климата / Е.Н. Долгополова, М.В. Исупова // Водные ресурсы. — 2023. — Т. 50. — № 2. — С. 127–138.
5. Долгополова Е.Н. Гидролого-морфологические процессы в дельтах криолитозоны: дельты рек Лены и Маккензи / Е.Н. Долгополова, М.В. Исупова // Водные ресурсы. — 2021. — Т. 48. — № 4. — С. 390–406.
6. Исупова М.В. Наводнения в устьевых областях рек России, причины их возникновения и последствия / М.В. Исупова // Сб. научных трудов Евразийского Научного Объединения «Актуальные вопросы развития науки в мире». — 2017. — Т. 26. — № 4. — С. 189–193.
7. Ленское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов «Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Индигирка». № 76-п. июнь 2014 г. — 87 с. — URL: <https://lbvu.ru/> (дата обращения: 10.02.2024)
8. Магрицкий Д.В. Опасные гидрологические процессы на устьевых участках Сев. Двины и Печоры / Д.В. Магрицкий, Е.Н. Скрипник // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы гидроэкологии и геоэкологии». — Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2016. — 129 с.

9. Магрицкий Д.В. Естественные и антропогенные изменения гидрологического режима низовьев и устьев крупнейших рек Восточной Сибири: Автореф. дисс. канд. геогр. наук.: 25.00.27/ Магрицкий Дмитрий Владимирович. — МГУ. — М., 2001. — 22 с.
10. Национальный Атлас России — Т. 2. Климат. — 2004 – 2021 гг. — URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/174-175.html> (дата обращения: 10.02.2024)
11. Нижняя Яна: устьевые и русловые процессы. — М.: ГЕОС, 1998. — 212 с.
12. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России: монография / Отв. ред. Д.В. Козлов. — Москва: РГАУ–МСХА, 2015. — 348 с.
13. Нормы и тренды температуры и осадков для регионов России // ФГБУ «Институт глобального климата и экологии им. Академика Ю.А. Израэля». — URL: <http://www.igce.ru/performance/map-data/climate-monitoring-data-for-russian-regions/norms-and-trends-of-temperature-and-precipitation-in-russian-regions/> (дата обращения: 10.02.2024)
14. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» // Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центр данных. — URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения 12.02.2024).
15. Agafonova S.A. Modern characteristics of the ice regime of Russian Arctic rivers and their possible changes in the 21st century / S.A. Agafonova, N.L. Frolova, G.V. Surkova [et al.] // *Geography, Environment, Sustainability*. — 2017. — V.10. — № 4. — P. 4–15.
16. Alaska’s Thawing Permafrost // USGS – NASA. — URL: <http://landsat.gsfc.nasa.gov> (accessed: 12.02.2024)
17. Antonova S. Thaw Subsidence of a Yedoma Landscape in Northern Siberia, Measured In Situ and Estimated from TerraSAR-X Interferometry / S. Antonova, H. Sudhaus, T. Strozzi [et al.] // *Remote Sensing*. — 2018. — V.10. — № 494.
18. Arnfield A. J. Köppen climate classification / A. J. Arnfield // *Encyclopedia Britannica*. — 16 Oct. 2023. — URL: <https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification> (accessed: 11.04.2024).
19. Baker M. Colville River Delta Spring Breakup Monitoring & Hydrological Assessment. Final. Document № 178181-MBI-HH-RPT-002 / M. Baker. — 2020. — 216 p.
20. Beltaos S. Measurements and analysis of ice breakup and jamming characteristics in the Mackenzie Delta, Canada / S. Beltaos, T. Carter, R. Rowsel // *Cold Regions Science and Technology*. — 2012. — V. 82. — P. 110–123.
21. Beltaos S. Morphology and genesis of deep scour holes in the Mackenzie Delta / S. Beltaos, T. Carter, T. Prowse // *Can. J. Civil Engineering*. — 2011. — V. 38. — P. 638–649.
22. Beltaos S. River-ice hydrology in a shrinking cryosphere / S. Beltaos, T. Prowse // *Hydrological Processes*. — 2009. — V.23. — P. 122–144.
23. Burn J.J. Pingos in the Yukon-Kuskokwim delta, Alaska: their plant succession and use by mink / J.J. Burn // *Arctic*. — 1964. — V. 17. — No. 3. — P. 203–210. — DOI: 10.14430/arctic3504
24. Buzard R.M. Coastal flood impact assessments for Alaska communities: Kotlik / R.M. Buzard, J.R. Overbeck, M.M. Turner [et al.] // *Coastal flood impact assessments for Alaska communities. Report of Investigation*. — 2021-1C. — Alaska: Division of Geological & Geophysical Surveys. — 2021. — 57 p.
25. Dolgoplova E.N. Sea and river ice impact on river mouths processes / E.N. Dolgoplova // *Proceedings of the 26th IAHR International Symposium on Ice*. — 2022. — Montréal, Canada. — P. 1–10.
26. Environment and natural resources // The official website of the Government of Canada. — URL: https://climate.weather.gc.ca/climate_normals/index_e.html (accessed: 11.04.2024).
27. Hansen J. Young people’s burden: Requirement of negative CO2 emissions / J. Hansen, M. Sato, P. Kharecha [et al.] // *Earth System Dynamics*. — 2017. — V. 8. — P. 577–616.
28. Herman-Mercer N. Indigenous Observations of Climate Change in the Lower Yukon River Basin, Alaska / N. Herman-Mercer, P.F. Schuster, K.B. Maracle // *Human Organization*. — 2011. — V. 70. — № 3. — P. 244–252.
29. Local Hazards Mitigation Plan. City of Emmonak WH Pacific, Inc. Bechtol Planning and Development / ed. Redfox J. D., Benedict M.C. [et al.] — Alaska: Emmonak City Council. — 2008. — 78 p.
30. Magritsky D. Changes in hydrological regime and morphology of river deltas in the Russian Arctic / D. Magritsky, V. Mikhailov, V. Korotaev [et al.] // *Proceedings of HP1, IAHS-IAPSO-IASPEL Assembly*. — Sweden. — Gothenburg: IAHS Press. 2013. — P. 67–79.
31. Makarieva O. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost / O. Makarieva, N. Nesterova [et al.] // *The Cryosphere*. EGU. — 2018. — P. 1–38. — DOI: 10.5194/tc-2018-157
32. McClelland J.W. Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset, Version 20240125. 2024 / J.W. McClelland, S.E. Tank, R.G.M. Spencer [et al.] — URL: <https://www.arcticrivers.org/data> (accessed: 11.04.2024)
33. McClelland J.W. River export of nutrients and organic matter from the North Slope of Alaska to the Beaufort Sea / J.W. McClelland, A. Townsend-Small, R.M. Holmes [et al.] // *Water Resources Research*. — 2014. — V. 50. — P. 1823–1839.
34. Mitchell T.D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids / T.D. Mitchell, P.D. Jones // *International Journal of Climatology*. — 2005. — V. 25. — P. 693–712. — URL: http://nsidc.org/data/docs/fgdc/ggd650_froz_ground_area/index.html (accessed: 11.04.2024)
35. Morse P.D. Influence of snow on near-surface ground temperatures in upland and alluvial environments of the outer Mackenzie Delta, Northwest Territories / P.D. Morse, C.R. Burn, S.V. Kokelj // *Canadian Journal of Earth Science*. — 2012. — V.49. — № 8. — P. 895–913.
36. NOAA Atlas 14, Precipitation-Frequency Atlas of the United States Volume 7 Version 2.0. – Alaska: Silver Spring (MD). 2012. — URL: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/22615> (accessed: 11.04.2024)
37. Osborne E. Arctic Report Card 2018 / E. Osborne, J. Richter-Menge, M. Jeffries. — URL: <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card> (accessed: 11.04.2024)

38. Payne C. Remote Sensing of River Erosion on the Colville River, North Slope Alaska / C. Payne, S. Panda, A. Prakash // *Remote Sensing*. — 2018. — V. 10. — № 397. — P. 1–20.
39. Painter S.L. Drying of tundra landscapes will limit subsidence-induced acceleration of permafrost thaw / S.L. Painter, E.T. Coon [et al.] // *Earth, atmospheric, and planetary sciences*. — 2023. — V. 120. — № 8. — DOI: 10.1073/pnas.2212171120
40. Shiklomanov A.I. Arctic Great Rivers Observatory / A.I. Shiklomanov, R.M. Holmes, J.W. McClelland [et al.] // *Discharge Dataset, Version 2023.10*. — URL: <https://www.arcticrivers.org/data> (accessed: 11.04.2024)
41. Suzuki K. Accelerated continental-scale snowmelt and ecohydrological impacts in the four largest Siberian river basins in response to spring warming / K. Suzuki, T. Hiyama, K. Matsuo [et al.] // *Hydrological Processes*. — 2020. — V. 34. — P. 3867–3881.
42. Tessler Z.D. Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world / Z.D. Tessler, C.J. Vörösmarty, M. Grossberg [et al.] // *Science*. — 2015. — V. 349. — P. 638–643.
43. USGS Science for changing world: data base. — URL: <https://www.usgs.gov/products/data> (accessed: 11.04.2024)
44. Walker H.J. Hydrologic and geomorphic processes in the Colville River delta, Alaska / H.J. Walker, P.F. Hudson // *Geomorphology*. — 2003. — V. 56. — P. 291–303.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Agafonova S.A. Navodneniya na rekah i poberezh'yah arkticheskoj zony Rossii [Floods on the rivers and coasts of the Arctic zone of Russia] / S.A. Agafonova, D.V. Magrickij, F.A. Romanenko [et al.] // *Trudy Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Nauchnye problemy ozdorovleniya rossijskih rek i puti ih resheniya»*. Nizhnij Novgorod, 08-14 sentyabrya 2019 g. [Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with international participation "Scientific health problems of Russian rivers and ways to solve them". Nizhny Novgorod, September 08-14, 2019] // Editorial board: O.P. Avandeeva [et al.]. — M.: Studiya F1, 2019. — 572 p. [in Russian]
2. Alekseev G.V. Klimaticheskie izmeneniya v Arktike i severnoj polyarnoj oblasti [Climate change in the Arctic and the Northern Polar region] / G.V. Alekseev, V.F. Radionov, E.I. Aleksandrov [et al.] // *Problemy Arktiki i Antarktiki* [Problems of the Arctic and Antarctic]. — 2010. — V. 84. — № 1. — P. 67–80 [in Russian].
3. Vuglinskij V.S. Ocenka izmenenij harakteristik ledovogo rezhima vodnyh ob'ektov dlya razlichnyh regionov strany v sovremennyh klimaticheskikh usloviyah [Assessment of changes in the characteristics of the ice regime of water bodies for different regions of the country in modern climatic conditions] / V.S. Vuglinskij // *Vestnik S.-Peterburgskogo universiteta Ser. 7* [Bulletin of St. Petersburg University Ser. 7]. — 2014. — № 3. — P. 32–45 [in Russian]
4. Dolgopolova E.N. Sovremennye izmeneniya osnovnyh sostavlyayushchih vodnogo balansa del't Pechory i Kolymy v usloviyah potepleniya klimata [Modern changes in the main components of the water balance of the Pechora and Kolyma Delta in the context of climate warming] / E.N. Dolgopolova, M.V. Isupova // *Vodnye resursy* [Water resources]. — 2023. — V. 50. — № 2. — P. 127–138 [in Russian].
5. Dolgopolova E.N. Gidrologo-morfologicheskie processy v del'tah kriolitozony: del'ty rek Leny i Makkenzi [Hydrological and morphological processes in the deltas of the cryolithozone: the deltas of the Lena and Mackenzie rivers] / E.N. Dolgopolova, M.V. Isupova // *Vodnye resursy* [Water resources]. — 2021. — V. 48. — № 4. — P. 390–406 [in Russian].
6. Isupova M.V. Navodneniya v ust'evykh oblastyah rek Rossii, prichiny ih vozniknoveniya i posledstviya [Floods in the estuaries of Russian rivers, their causes and consequences] / M.V. Isupova // *Sb. nauchnyh trudov Evrazijskogo Nauchnogo Ob"edineniya «Aktual'nye voprosy razvitiya nauki v mire»* [Collection of scientific papers of the Eurasian Scientific Association "Topical issues of the development of science in the world"]. — 2017. — V. 26. — № 4. — P. 189–193 [in Russian].
7. Lenskoe bassejnovoe vodnoe upravlenie Federal'nogo agentstva vodnyh resursov «Skhema kompleksnogo ispol'zovaniya i ohrany vodnyh ob'ektov bassejna reki Indigirka». № 76-p. iyun' 2014 g [Lena Basin Water Management of the Federal Agency for Water Resources "Scheme of integrated use and protection of water bodies" facilities of the Indigirka River basin". No. 76-S. June 2014]. — 87 p. — URL: <https://lbvu.ru/> (accessed: 10.02.2024) [in Russian]
8. Magrickij D.V. Opasnye gidrologicheskie processy na ust'evykh uchastkah Sev. Dviny i Pechory [Dangerous hydrological processes in the estuarine areas of the North. Dvina and Pechora] / D.V. Magrickij, E.N. Skripnik // *Trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye voprosy gidroekologii i geoekologii»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Topical issues of hydroecology and geocology"]. — Perm': Publishing house of Perm. university, 2016. — 129 p. [in Russian]
9. Magrickij D.V. Estestvennyye i antropogennyye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima nizov'ev i ust'ev krupnejshih rek Vostochnoj Sibiri: Avtoref. diss. kand. geogr. nauk.: 25.00.27 [State and anthropogenic changes in the hydrogeological regime in Russia and abroad: Abstract of the thesis Candidate of Technical Sciences. Dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Geographical specialty: 25.00.27] / Magrickij Dmitrij Vladimirovich. — MGU. — M., 2001. — 22 p. [in Russian]
10. Nacional'nyj Atlas Rossii [The National Atlas of Russia] — V. 2. Climate. — 2004 – 2021. — URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/174-175.html> (accessed: 10.02.2024) [in Russian]
11. Nizhnaya Yana: ust'evye i ruslovyje processy [Lower Yana: estuarine and riverbed processes]. — M.: GEOS, 1998. — 212 p. [in Russian]
12. Opasnye ledovye yavleniya na rekah i vodohranilishchah Rossii: monografiya [Dangerous ice phenomena on rivers and reservoirs in Russia: monograph] / ed. by D.V. Kozlov. — Moskva: RGAU–MSKHA, 2015. — 348 p. [in Russian]
13. Normy i trendy temperatury i osadkov dlya regionov Rossii [Norms and trends of temperature and precipitation for the regions of Russia] // FGBU « Institute of Global Climate and Ecology named after Academician Yu.A. Israel». — URL: <http://www.igce.ru/performance/map-data/climate-monitoring-data-for-russian-regions/norms-and-trends-of-temperature-and-precipitation-in-russian-regions/> (accessed: 10.02.2024) [in Russian]

14. FGBU «VNIIGMI-MCD» // Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut gidrometeorologicheskoy informacii – mirovoj centr dannyh [All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center]. — URL: <http://meteo.ru/> (accessed 12.02.2024) [in Russian].
15. Agafonova S.A. Modern characteristics of the ice regime of Russian Arctic rivers and their possible changes in the 21st century / S.A. Agafonova, N.L. Frolova, G.V. Surkova [et al.] // *Geography, Environment, Sustainability*. — 2017. — V.10. — № 4. — P. 4–15.
16. Alaska's Thawing Permafrost // USGS – NASA. — URL: <http://landsat.gsfc.nasa.gov> (accessed: 12.02.2024)
17. Antonova S. Thaw Subsidence of a Yedoma Landscape in Northern Siberia, Measured In Situ and Estimated from TerraSAR-X Interferometry / S. Antonova, H. Sudhaus, T. Strozzi [et al.] // *Remote Sensing*. — 2018. — V.10. — № 494.
18. Arnfield A. J. Köppen climate classification / A. J. Arnfield // *Encyclopedia Britannica*. — 16 Oct. 2023. — URL: <https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification> (accessed: 11.04.2024).
19. Baker M. Colville River Delta Spring Breakup Monitoring & Hydrological Assessment. Final. Document № 178181-MBI-HH-RPT-002 / M. Baker. — 2020. — 216 p.
20. Beltaos S. Measurements and analysis of ice breakup and jamming characteristics in the Mackenzie Delta, Canada / S. Beltaos, T. Carter, R. Rowsel // *Cold Regions Science and Technology*. — 2012. — V. 82. — P. 110–123.
21. Beltaos S. Morphology and genesis of deep scour holes in the Mackenzie Delta / S. Beltaos, T. Carter, T. Prowse // *Can. J. Civil Engineering*. — 2011. — V. 38. — P. 638–649.
22. Beltaos S. River-ice hydrology in a shrinking cryosphere / S. Beltaos, T. Prowse // *Hydrological Processes*. — 2009. — V.23. — P. 122–144.
23. Burn J.J. Pingos in the Yukon-Kuskokwim delta, Alaska: their plant succession and use by mink / J.J. Burn // *Arctic*. — 1964. — V. 17. — No. 3. — P. 203–210. — DOI: 10.14430/arctic3504
24. Buzard R.M. Coastal flood impact assessments for Alaska communities: Kotlik / R.M. Buzard, J.R. Overbeck, M.M. Turner [et al.] // *Coastal flood impact assessments for Alaska communities. Report of Investigation*. — 2021-1C. — Alaska: Division of Geological & Geophysical Surveys. — 2021. — 57 p.
25. Dolgoplova E.N. Sea and river ice impact on river mouths processes / E.N. Dolgoplova // *Proceedings of the 26th IAHR International Symposium on Ice*. — 2022. — Montréal, Canada. — P. 1–10.
26. Environment and natural resources // The official website of the Government of Canada. — URL: https://climate.weather.gc.ca/climate_normals/index_e.html (accessed: 11.04.2024).
27. Hansen J. Young people's burden: Requirement of negative CO2 emissions / J. Hansen, M. Sato, P. Kharecha [et al.] // *Earth System Dynamics*. — 2017. — V. 8. — P. 577–616.
28. Herman-Mercer N. Indigenous Observations of Climate Change in the Lower Yukon River Basin, Alaska / N. Herman-Mercer, P.F. Schuster, K.B. Maracle // *Human Organization*. — 2011. — V. 70. — № 3. — P. 244–252.
29. Local Hazards Mitigation Plan. City of Emmonak WH Pacific, Inc. Bechtol Planning and Development / ed. Redfox J. D., Benedict M.C. [et al.] — Alaska: Emmonak City Council. — 2008. — 78 p.
30. Magritsky D. Changes in hydrological regime and morphology of river deltas in the Russian Arctic / D. Magritsky, V. Mikhailov, V. Korotaev [et al.] // *Proceedings of HP1, IAHS-IAPSO-IASPEL Assembly*. — Sweden. — Gothenburg: IAHS Press. 2013. — P. 67–79.
31. Makarieva O. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost / O. Makarieva, N. Nesterova [et al.] // *The Cryosphere*. EGU. — 2018. — P. 1–38. — DOI: 10.5194/tc-2018-157
32. McClelland J.W. Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset, Version 20240125. 2024 / J.W. McClelland, S.E. Tank, R.G.M. Spencer [et al.] — URL: <https://www.arcticrivers.org/data> (accessed: 11.04.2024)
33. McClelland J.W. River export of nutrients and organic matter from the North Slope of Alaska to the Beaufort Sea / J.W. McClelland, A. Townsend-Small, R.M. Holmes [et al.] // *Water Resources Research*. — 2014. — V. 50. — P. 1823–1839.
34. Mitchell T.D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids / T.D. Mitchell, P.D. Jones // *International Journal of Climatology*. — 2005. — V. 25. — P. 693–712. — URL: http://nsidc.org/data/docs/fgdc/ggd650_froz_ground_area/index.html (accessed: 11.04.2024)
35. Morse P.D. Influence of snow on near-surface ground temperatures in upland and alluvial environments of the outer Mackenzie Delta, Northwest Territories / P.D. Morse, C.R. Burn, S.V. Kokelj // *Canadian Journal of Earth Science*. — 2012. — V.49. — № 8. — P. 895–913.
36. NOAA Atlas 14, Precipitation-Frequency Atlas of the United States Volume 7 Version 2.0. – Alaska: Silver Spring (MD). 2012. — URL: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/22615> (accessed: 11.04.2024)
37. Osborne E. Arctic Report Card 2018 / E. Osborne, J. Richter-Menge, M. Jeffries. — URL: <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card> (accessed: 11.04.2024)
38. Payne C. Remote Sensing of River Erosion on the Colville River, North Slope Alaska / C. Payne, S. Panda, A. Prakash // *Remote Sensing*. — 2018. — V. 10. — № 397. — P. 1–20.
39. Painter S.L. Drying of tundra landscapes will limit subsidence-induced acceleration of permafrost thaw / S.L. Painter, E.T. Coon [et al.] // *Earth, atmospheric, and planetary sciences*. — 2023. — V. 120. — № 8. — DOI: 10.1073/pnas.2212171120
40. Shiklomanov A.I. Arctic Great Rivers Observatory / A.I. Shiklomanov, R.M. Holmes, J.W. McClelland [et al.] // *Discharge Dataset, Version 2023.10*. — URL: <https://www.arcticrivers.org/data> (accessed: 11.04.2024)
41. Suzuki K. Accelerated continental-scale snowmelt and ecohydrological impacts in the four largest Siberian river basins in response to spring warming / K. Suzuki, T. Hiyama, K. Matsuo [et al.] // *Hydrological Processes*. — 2020. — V. 34. — P. 3867–3881.

42. Tessler Z.D. Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world / Z.D. Tessler, C.J. Vörösmarty, M. Grossberg [et al.] // *Science*. — 2015. — V. 349. — P. 638–643.
43. USGS Science for changing world: data base. — URL: <https://www.usgs.gov/products/data> (accessed: 11.04.2024)
44. Walker H.J. Hydrologic and geomorphic processes in the Colville River delta, Alaska / H.J. Walker, P.F. Hudson // *Geomorphology*. — 2003. — V. 56. — P. 291–303.