

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 556.542; ГРНТИ 37.27.03; 37.27.31

## МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА ДЕЛЬТ ПЕЧОРЫ И КОЛЫМЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

*Долгополова Е.Н. \*, Исупова М.В. \*\**

©2022 г.

*\*кандидат технических наук, старший научный сотрудник**\*\*кандидат географических наук, старший научный сотрудник**\*\*\*Институт водных проблем РАН**119333 Москва, ул. Губкина, 3*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.7.95.1643

### АННОТАЦИЯ

В статье проводится сравнение многолетних изменений составляющих водного баланса дельт рек Печоры и Колымы, расположенных в зоне распространения прерывистых и сплошных многолетнемерзлых пород. Рассмотрены тенденции изменения основных составляющих уравнения водного баланса дельт (водного стока рек, осадков, потерь (или добавления) стока в дельтах) в условиях потепления климата (конец XX – начало XXI вв.). Отмечается явный рост величин основных составляющих водного баланса, особенно заметный в последнее время (2008–2018 гг.).

### ABSTRACT

We compare the long-term changes in the components of the water balance of the Pechora and Kolyma River deltas located in sporadic and continuous permafrost. The trends of changes in the main components of the delta water balance equation (river water runoff, precipitation, runoff loss (or addition) at deltas) under the climate warming (late XX – early XXI centuries) are considered. Our analysis reveals a clear increase of the values of the main components of the water balance, especially noticeable recently (2008–2018).

**Ключевые слова:** Печора, Колыма, дельта, водный баланс, сток воды, осадки, потери стока.

**Keywords:** Pechora, Kolyma, delta, water balance, water runoff, precipitation, runoff losses.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время режим устьев рек Арктики заметно меняется в результате потепления климата. Повышение среднегодовой температуры воздуха  $T$  за последние сто лет к концу первого десятилетия XXI в. составило  $1.17^{\circ}\text{C}$  по сравнению с усредненной за 1880–1920 гг., причем максимальное увеличение на  $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$  наблюдалось в субарктических областях России и Северной Америки [26]. Изменение режима  $T$  и осадков  $P$  в свою очередь влияют на величину водозапаса снежного покрова на водосборах крупных рек данного региона (Оби, Енисея, Лены, Колымы), одного из основных факторов, влияющих на увеличение стока этих рек в Северный Ледовитый океан [30]. Различные работы, посвященные исследованиям многолетних изменений расходов воды в речных устьях субарктического региона, свидетельствуют об устойчивом росте водного стока рек этого региона в последние годы [2–4, 8, 10, 11, 14, 27–30, 32].

Значительная часть побережья Северного Ледовитого океана и устья впадающих в него рек лежат в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Рост температуры воздуха в зоне ММП обуславливает развитие многих процессов, слабо проявлявших себя раньше. Увеличение глубины сезонного протаивания приводит к росту количества таликов, а увеличение их площадей способствует росту слабого грунтового питания

рек зимой [9, 33]. Прогнозируется, что в результате оттаивания мерзлоты и проседания грунта площадь озер на Арктическом побережье может увеличиться к 2100 г. на 50% [27]. В озерах на территории субарктических дельт сосредотачивается большая запас воды и наносов во время половодья. С ростом таликов часть этого запаса просачивается в грунт, пополняя запасы подземных вод, и не доходит до океана [28]. В то же время растет эрозионная способность берегов озер, а разрушение берегов приводит к росту площади зеркала озер, что увеличивает испарение в дельтах.

Все описанные процессы влияют на формирование составляющих водного баланса дельт. Цель данной статьи – сравнение тенденций многолетних изменений составляющих водного баланса двух дельт российского арктического побережья – Печоры и Колымы, водосборы которых расположены в зоне распространения прерывистого (Печора) и сплошного (Колыма) распространения ММП.

### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эстуарно-дельтовая устьевая область (УО) Печоры (рис. 1, а) общей площадью  $10.7$  тыс.  $\text{km}^2$  включает в себя приливный широкопойменный устьевой участок реки (дл.  $70$  км), многорукавную дельту выполнения (пл.  $2590$   $\text{km}^2$  [13]) и отмелое полузакрытое устьевое взморье – Печерскую губу Баренцева моря (пл.  $5240$   $\text{km}^2$  [13]).

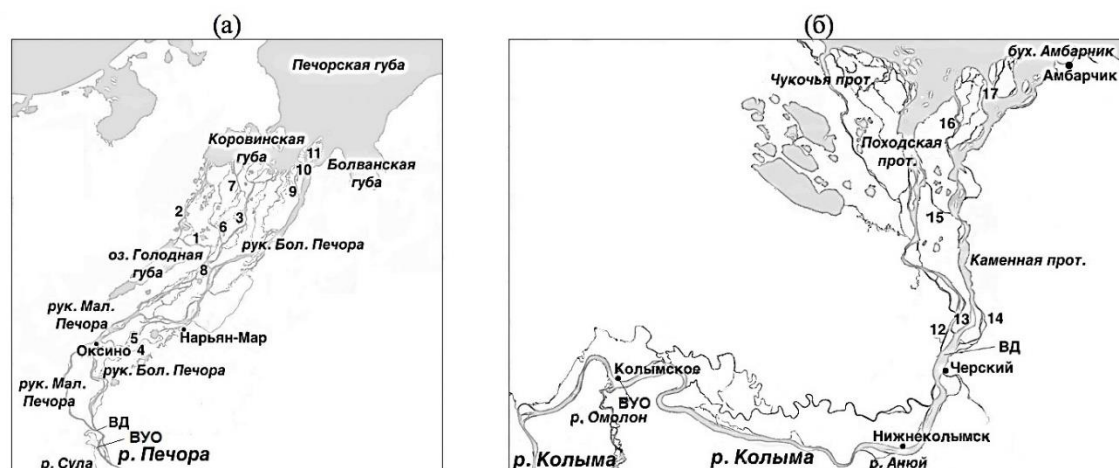


Рисунок 1. Карты-схемы устьев Печоры (а) и Колымы (б) на основе [Яндекс.Карты].  
 Рукава (шары, протоки): Утчер (1), Тундровый (2), Средний (3), Городецкий (4), Голубковский (5), Крестовый (6), Болдин (7), Месин (8), Глубокий (9), Каменный (10), Неволин (11), Черноусовская (12), Мархаяновская (13), Таловая (14), 1-ая Поперечная (15), Селивановская (16), 2-ая Поперечная (17).  
 ВД – вершина дельты, ВУО – вершина устьевой области.

Вершина УО Печоры расположена в районе впадения в нее р. Сулы (в месте выклинивания приливных колебаний уровня воды в межень), а вершина дельты (ВД) – в месте разделения реки на крупные рукава Большая и Малая Печора (в ~120 км от морского края дельты (МКД)). Основные рукава дельты (шары): Утчер (впадает в оз. Голодная губа), Тундровый (вытекает из оз.

Голодная губа), Средний, Городецкий, Голубковский, Крестовый, Болдин, Глубокий. В устье рук. Бол. Печора расположен обширный Печорский бар, главные бороздины которого судоходны. Основные гидролого-морфометрические характеристики дельты представлены в табл. 1.

Таблица 1.

**Гидролого-морфометрические характеристики устьевых областей Печоры и Колымы по расчетам авторов и данным [13, 17].**

Характеристика	Печора	Колыма
Площадь дельты $F_d$ , км <sup>2</sup>	2590	3250
Длина главного рукава, км	120	113
Протяженность МКД, км	66	80
Количество выходов в море	14	6
Ср. многол. расход воды в ВД, $Q_m$ , м <sup>3</sup> /год	4120–4230	3320–3960
Ср. многол. сток воды в ВД, $W_Q$ , км <sup>3</sup> /год	130–133	105–125
Ср. макс. расход воды, $Q_{max}$ , м <sup>3</sup> /с	23000	17200
Ср. мин. расход воды, $Q_{min}$ , м <sup>3</sup> /с:		
летний	~2500	1560
зимний	430	54.2
Стоковые колебания уровня воды, м	5.0–9.0	5.0–6.0
Температура воды в ВД, °С	<1–15	1–14
Продолжительность ледостава, сут.	>200	~238
Период открытого русла, сут.	~145	~110
Величина на МКД, м:		
приливов	0.7 (0.42–1.02)	0.1
нагонов	2.0–3.0	2.5
Дальность распространения в дельту, км:		
приливов	160 (межень) 10–15 (полов.)	–
обратных течений в прилив	80	–
нагонов	150–160	282
осолоненных вод	~10	–

Климатические условия в дельте продолжительного холодного сезона. характеризуются наличием с ноября по апрель Среднегодовая  $T$  в г. Нарьян-Мар  $-3.2^{\circ}\text{C}$  (от –

17.1°C в феврале до +16°C в июле), годовые  $P$  – 400–500 мм. Низовья Печоры (~50% участка реки согласно [32]), в том числе дельта, расположены в зоне распространения прерывистых ММП. В то же время по расчетам авторов настоящей статьи, основанных на материалах Международного центра данных по снегу и льду [25], 6% протяженности водотоков дельты приходится на сплошные ММП. Для дельты характерны многочисленные термокарстовые озера, тундровые и лесотундровые ландшафты, заболоченные участки.

Печора относится к рекам с весенним половодьем (преимущественно снеговое питание), осенними паводками и низкой зимней меженью. По расчетам авторов статьи, согласно данным [1, 20],  $Q_m$  на г/п Окисно (в ~40 км ниже ВД и 141 км от МКД) за 1932–2018 гг. составляет 4230 м<sup>3</sup>/с ( $W_Q$  134 км<sup>3</sup>/год); по данным [7, 13, 17] 4120–4402 м<sup>3</sup>/с. Свыше 56% годового стока приходится на период весеннего половодья (май – июнь). Сток воды в ВД распределяется между рукавами Бол. и Мал. Печора относительно равномерно, при этом в межень в Бол. Печоре сосредотачивается до 37.1% водного стока в ВД, а в Мал. Печоре – до 50.7% [7]. В приморской части дельты на перераспределение стока воды в водотоках и обводнение ее западной части оказывают влияние особенно заметные в межень реверсивные течения, формирующиеся в водотоках по мере продвижения в дельту приливной волны [2].

Дельтово-эстуарная УО Колымы относится включает устьевой участок реки (дл. 162 км), малорукавную дельту выдвигения ( $F_d$  3250 км<sup>2</sup>) и устьевое взморье (Восточно-Сибирское море). Вершина УО Колымы находится в месте впадения пр. Омолон (предельная дальность распространения нагонов), а ВД – в ~10 км ниже пос. Черский (~120 км от МКД) в месте разделения реки на протоки Каменная (главный судоходный рукав) и Черноусовская (ниже слияния с прот. Мархаяновская – Походская) (рис. 1, б). Правобережье дельты высокое, каменистое, покрыто редкостойными лесами; левобережье – низменная тундровая равнина, заболоченная, с множеством старичных и термокарстовых озер (площадь поверхности озер в дельте Колымы составляет 301 км<sup>2</sup> или 9.3%  $F_d$  [28]). В устьях проток Походской и Каменной находятся обширные бары. Основные гидролого-морфометрические характеристики дельты представлены в табл. 1.

Дельта Колымы расположена в условиях сурового арктического климата. Среднегодовая  $T$  в с. Нижнеколымск (~35 км выше ВД) –13°C (от –37.9°C в январе до +11.5°C в июле), годовые  $P$  ~200 мм. Дельта Колымы (как и весь бассейн реки) расположена в зоне распространения сплошных ММП (толщина деятельного слоя в дельте 0.5–0.6 м).

Колыма относится к рекам восточносибирского типа с неравномерным распределением стока в течение года

(преимущественно летом). Основные источники питания – талые воды (47%) и дожди (42%), доля подземного питания не более 11% [17]. Величина  $Q_m$  в замыкающем створе г/п Колымское (ниже впадения р. Омолон, в ~260 км от МКД) за 1978–2018 гг. составляет 3320 м<sup>3</sup>/с (105 км<sup>3</sup>/год). Сток воды в дельте в конце XX в. распределялся между основными рукавами – Каменной и Походской протоками – примерно в равных долях – ~59 и 41% стока в ВД соответственно [17]. Ниже по течению доля стока прот. Каменной снижается (до 38.9%) вследствие оттока воды в боковые протоки, доля же стока прот. Походская немного увеличивается (до 42.5%) за счет впадения в нее боковых проток, вытекающих из Каменной.

Несмотря на суровые климатические условия, заболоченность, наличие ММП, затрудняющих освоение природных ресурсов дельт Печоры и Колымы, устья этих рек испытывают существенную антропогенную нагрузку (водный транспорт, оленеводство, рыболовство). В дельте Печоры получил развитие также нефтегазовый комплекс, на Колыме – производство электроэнергии. В верхнем течении реки (в ~1840 км от устья) действует Колымская ГЭС, строительство которой было начато в 1978 г. В 1991 г. в 217 км ниже по течению началось строительство Усть-Среднеканской ГЭС, окончательный ввод в строй которой намечен на 2022 г. Согласно [8], антропогенное воздействие на дельту Колымы оценивается как равновесное.

#### МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для оценки многолетних изменений водного баланса дельт использовалось упрощенное уравнение баланса, полученное из полного уравнения водного баланса дельты [16]:

$$W_Q + W_1 + W_2 + P = \Sigma W_i + W_3 + E \pm \Delta W, (1)$$

где  $W_Q$  – приток речных вод в ВД,  $W_1$  – боковой поверхностный приток к дельте с местного водосбора,  $W_2$  – подземный приток к дельте,  $P$  – осадки на поверхность дельты,  $\Sigma W_i$  – суммарный поверхностный отток вод из дельты в приемный водоем,  $W_3$  – подземный отток за пределы дельты,  $E$  – испарение с поверхности дельты,  $\pm \Delta W$  – изменение запасов воды в дельте за расчетный период времени (все составляющие в км<sup>3</sup>/год). Если  $W_Q$ ,  $W_1$  и иногда  $\Sigma W_i$  можно определить гидрометрическим путем, то для расчетов величины  $W_2$ ,  $W_3$  требуются сложные гидрогеологические исследования. В данной работе было принято, что  $W_1$  и  $W_3 \ll W_Q$ , поэтому этими характеристиками можно пренебречь. Упрощенное уравнение водного баланса дельты принимает вид:

$$W_Q + W_2 + P = \Sigma W_i + E \pm \Delta W, (2)$$

При рассмотрении водного баланса дельт за многолетний период, величину  $\pm \Delta W$  принимают равной 0.  $W_i$  для больших дельт, как правило, очень

мал по сравнению с  $W_Q$ . Для крупных дельт, у которых  $W_Q \gg W_i$ , особенно в случае отсутствия репрезентативных данных измерений бокового притока, величиной  $W_i$  можно пренебречь [16].  $P$  определяется по данным метеостанций в дельте или по картам распределения осадков. Основные сложности возникают при расчетах испарения. При отсутствии данных специальных наблюдений за удельным испарением с каждого вида дельтового ландшафта  $E$  оценивают по зональной величине испаряемости  $E_0$  [18]. Тогда разницу поступлений влаги в дельту за счет осадков и ее убыль за счет испарения ( $\Delta W_E$ , км<sup>3</sup>/год) можно рассчитать по формуле:

$$\Delta W_E = (P - E_0) \cdot F_d \cdot 10^{-6}, \quad (3)$$

где  $P$  и  $E_0$  – величины осадков и испаряемости в дельте (мм/год),  $F_d$  – площадь дельты в км<sup>2</sup> [18]. В случае  $P > E_0$  речь идет о добавлении стока в дельте,  $P < E_0$  – потерях стока в дельте. В итоге уравнение водного баланса примет вид:

$$W_Q - \sum W_i = \Delta W_E \quad (4).$$

Таким образом, если поступление воды к дельте превышает ее потери и водный сток вдоль дельты увеличивается, то водный баланс дельты считается положительным. Если потери воды превышают ее поступление и водный сток вдоль дельты уменьшается, то ее водный баланс считается отрицательным.

Для расчетов составляющих водного баланса устьев рек использовались данные, представленные в [1, 5, 12, 15, 20, 23, 24, 29]. Временные интервалы многолетних изменений составляющих обусловлены наличием в [1, 12, 15, 20]

репрезентативных данных как за весь период инструментальных наблюдений, так и в настоящее время (2008–2018 гг.).

#### ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА ДЛЯ ДЕЛЬТЫ ПЕЧОРЫ И КОЛЫМЫ

Для большинства речных дельт российского побережья Северного Ледовитого океана, расположенных в зоне тундры и лесотундры, характерны дельтовые ландшафты, схожие с ландшафтами окружающей местности и находящиеся в состоянии близком к естественному (за исключением освоенных дельт Сев. Двины, Печоры и Яны). Для этих дельт, расположенных в области достаточного увлажнения ( $E_0/P$  от 0.49 до 0.70), в целом характерен нейтрально-положительный водный баланс и климатически обусловленное небольшое возрастание стока [19]. Наибольший вклад в приходную часть баланса дельт, как правило, вносит речной сток.

*Речной и местный сток.* Как было указано выше,  $Q_m$  Печоры на г/п Оксина за 1932–2018 гг. составляет 4120–4230 м<sup>3</sup>/с (130–134 км<sup>3</sup>/год). При этом в многолетних изменениях  $Q_m$  отмечается его увеличение с интенсивностью ~0.20%/год (рис. 2, а). Согласно данным [1], за недавнее время (2008–2018 гг.)  $Q_m$  возрос до 4640 м<sup>3</sup>/с (146 км<sup>3</sup>/год), т.е. на ~9.7% по сравнению с 1932–2005 гг. (по данным [20]), а средний  $Q_{max}$  и  $Q_{min}$  летний и зимний за 2008–2019 гг. также увеличились (табл. 1) и составили по данным [1] 29840, 2620 и 587 м<sup>3</sup>/с соответственно. В [6] приведена величина стока воды в дельте Печоры ниже г/п Оксина, – 142 км<sup>3</sup>/год и которую можно принять за  $\sum W_i$  в формулах (1, 2).

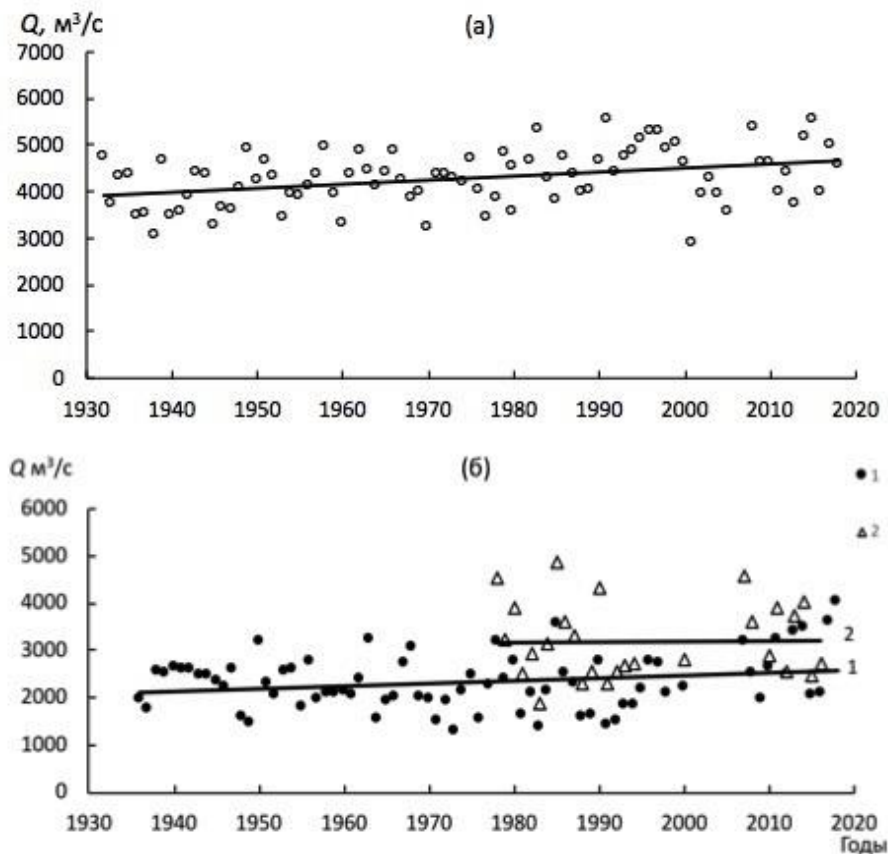


Рисунок 2. Многолетние изменения расхода воды в ВД Печоры на г/п Оксино за 1932–2018 гг. (а) и Колымы на г/п Среднеколымск за 1936–2018 гг. (1) и Колымское за 1978–2018 гг. (2) (б)

После строительства на Колыме плотины ГЭС в 1978 г. начались постоянные измерения  $Q$  в замыкающем створе на г/п Колымское, фактически прекратившиеся в настоящее время. С 2009 г. данные на этом г/п – восстановленные по измерениям на г/п Среднеколымск [29], поскольку коэф. корреляции  $r$  между величинами  $Q_m$  на этих постах  $\sim 0.95\text{--}0.98$  (1978–2018 гг.). Среднегодовой  $Q$  на г/п Колымское за 1978–2018 гг. увеличивался с интенсивностью  $0.26\%/год$  (рис. 2, б) при  $Q_m$   $3320\text{ м}^3/с$  ( $105\text{ км}^3/год$ ). С учетом водного стока правого пр. Анюй ( $580\text{ м}^3/с$ ,  $18.3\text{ км}^3/год$  [21]), впадающего в Колыму в  $105\text{ км}$  ниже г/п Колымское,  $Q_m$  в ВД Колымы получается равным  $3900\text{ м}^3/с$  ( $123\text{ км}^3/год$ ).

Величина  $Q_m$  Колымы по наиболее длинному ряду наблюдений за 1936–2018 гг. на г/п Среднеколымск (в  $641\text{ км}$  от МКД и  $1203\text{ км}$  ниже Колымской ГЭС), составляет  $2321\text{ м}^3/с$ . За весь период наблюдений отмечается рост  $Q$  Колымы с интенсивностью  $0.24\%/год$  (рис. 2, б). При этом в условиях естественного водного режима в 1936–1978 гг. ( $Q_m$   $2240\text{ м}^3/с$ ) расход воды уменьшался с интенсивностью  $\sim 0.24\%/год$ . После ввода в строй первого и второго агрегатов ГЭС в 1982 г. интенсивность роста  $Q$  увеличилась до  $0.93\%/год$  за 1982–2016 гг. при  $Q_m$   $2340\text{ м}^3/с$ . В 2008–2018 гг.

также наблюдается рост  $Q$  Колымы (г/п Среднеколымск) при  $Q_m$   $2860\text{ м}^3/с$ , а средний  $Q_{max}$  и  $Q_{min}$  летний и зимний за этот период также увеличились (табл. 1) и составили по данным [1] 19800, 1740 и  $350\text{ м}^3/с$  соответственно. Рассчитанные авторами статьи величины  $Q_m$  и  $W_Q$  Колымы в ВД близки к приведенным в [4, 6] значениям  $3320\text{ м}^3/с$  и  $104\text{ км}^3/год$ . В [6] отмечено возрастание расхода воды в дельте при приближении к МКД до  $3930\text{ м}^3/с$  ( $124\text{ км}^3/год$ ).

Авторами статьи приближенно оценен сток воды рек в гарантированно-подледный период с января по апрель, когда реки получают исключительно грунтовое (подземное) питание. Для дельты Печоры величина  $Q$  в подледный период за 1981–1993 гг. (рис. 3) по данным ежедневных наблюдений, представленных в [29], составила  $772.2\text{ м}^3/с$  ( $24.4\text{ км}^3/год$  или  $\sim 19\%W_Q$ ), причем отмечался слабый рост зимнего стока с интенсивностью  $0.5\text{--}0.7\%/год$ . Коэффициент корреляции между величинами среднегодового и зимнего  $Q$  составляет  $\sim 0.6$ . Поскольку, согласно климатическим прогнозам, в XXI в.  $T$  будет возрастать, доля зимнего стока также может увеличиваться.

Влияние регулирования стока Колымы на режим дельты Колымы невелико из-за большого

расстояния между ГЭС и ВД, и проявляется в основном в увеличении зимнего стока воды в дельте [14, 22]. В условиях естественного водного режима (1936–1978 гг.) отношение зимнего стока к среднегодовому на г/п Среднеколымск составляет

0.035. В период регулирования Колымской ГЭС и запуска Усть-Среднеканской ГЭС (2011–2019 гг.) отношение этих стоков в ВД на г/п Колымское возросло в 2.6 раза, а величина зимнего стока реки в ВД за этот период составляет 3.7 км<sup>3</sup>/год.

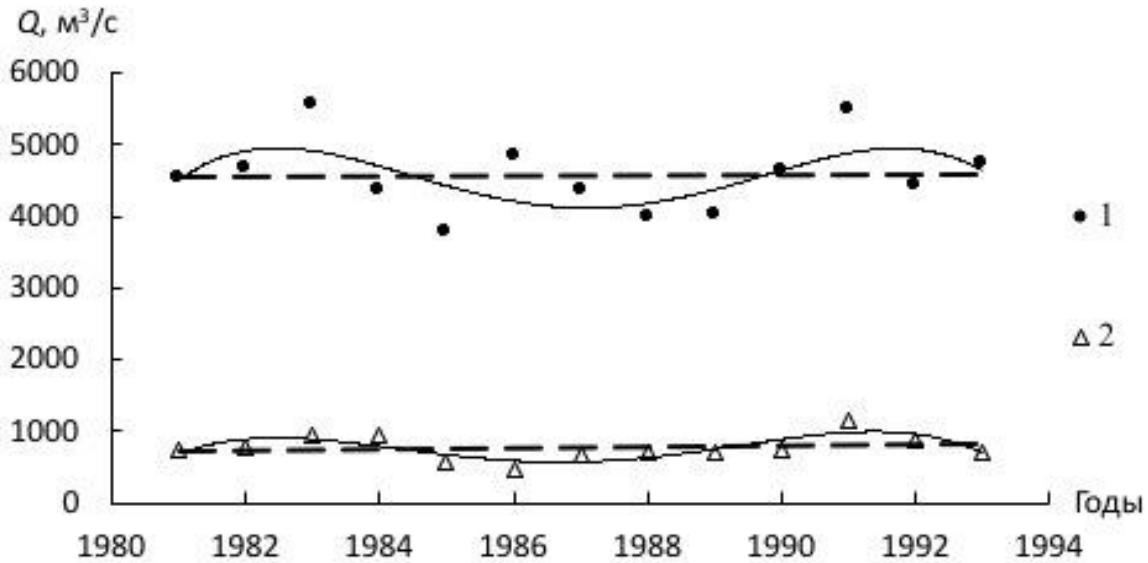


Рисунок 3. Изменения среднегодового (1) и подледного (2) расходов воды Печоры на г/п Оксино за 1981–1993 гг. (линии тренда: сплошная – полиномиальный, штриховая – линейный).

В дельтах Печоры и Колымы ниже их вершин нет внешних притоков с заметным расходом воды, поэтому в (4)  $W_i$  не учитывается. В качестве примера учета  $W_i$  в уравнении водного баланса можно привести арктическую дельту р. Маккензи, в левый рукав которой ниже ВД впадает р. Пил, дающая название этому рукаву и протекающая в сплошных ММП [11]. Расчет изменения стока р. Пил за 1975–2017 гг. по данным [31] дает  $W_i \cong 22$  км<sup>3</sup>/год, причем рост  $Q$  составляет  $\sim 0.02\%/год$ . Таким образом, можно ожидать рост  $W_i$  наряду с  $W_Q$  с сохранением соотношения  $W_i \ll W_Q$ , что незначительно увеличит приходную часть уравнения водного баланса дельты.

**Осадки.** Для субарктического региона характерен быстрый рост  $T$  [3, 10, 20]. В [10] приводится положительный тренд в изменениях  $T$  за 1976–2015 гг. –  $>0.72^\circ\text{C}/10$  лет в Восточной Сибири и  $>0.45^\circ\text{C}$  за 10 лет по России в целом. В [3] приводится рассчитанный относительно нормы за 1961–1990 гг. общий рост  $T$  для широтной зоны 60–70° с.ш., (в которой расположены дельты Печоры и

Колымы) за 1936–2009 гг. на  $0.8^\circ\text{C}$  ( $\sim 0.1^\circ\text{C}/10$  лет), а за 1980–2009 гг. –  $0.35^\circ\text{C}/10$  лет. По данным [20], на территории дельт Печоры и Колымы тренд  $T$  за 1976–2018 гг. –  $1.2\text{--}1.4^\circ\text{C}/10$  лет. Таким образом, интенсивность роста  $T$  на арктическом побережье увеличивается. Многолетние изменения  $T$  влекут за собой изменения увлажненности исследуемого региона. Авторами статьи были проанализированы представленные в [23] данные об осадках  $P$  на метеостанциях (м/с), расположенных в бассейнах Печоры (м/с Печора, Нарьян-Мар) и Колымы (м/с Среднеколымск, Островное, Амбарчик), а также сведения об осадках на м/с Черский (ВД Колымы), приведенные в [15]. Для обоих бассейнов рек характерно формирование основного слоя осадков в их верхних частях, а также наличие летнего максимума (июль–август) и зимнего минимума осадков (февраль–март).

В многолетних изменениях количества  $P$  за 1966–2019 (1966–2018) гг. отмечается слабый тренд увеличения (табл. 2).

Таблица 2.

**Многолетние изменения годовых сумм осадков  $P$  в бассейнах Печоры и Колымы.**

Река	М/с	$P$ , мм		Ур-е линейного тренда (1966–2018 гг.)	Коэф. аппрок. $r^2$
		1966–2018 гг.	2008–2018 гг.		
Печора	Печора	608	636	$P = 2.27t - 3916$	0.161
	Нарьян-Мар	477	494	$P = 2.31t - 4118$	0.164
Колыма	Среднеколымск	246	255	$P = 1.03t - 1811$	0.064
	Островное	237	245	$P = 0.16t - 77.5$	0.004
	Амбарчик	150	113	$P = -1.50t - 3134$	0.147
	Черский	233	274	$P = 0.99t - 1753$	0.078

При этом в 2008–2018 гг. рост  $P$  наблюдался на всех м/с за исключением расположенной в бух. Амбарчик (устьевое взморье Колымы). Так, на м/с Печора (в ~600 км выше ВД) и Нарьян-Мар годовая сумма возросла до 636 (0.37%/год) и 494 мм (0.48%/год) соответственно, а на м/с Среднеколымск, Островное (в 139 км ЮВ ВД Колымы) и Черский – до 255 (0.41%/год), 245 (0.07%/год) и 274 мм (0.42%/год) соответственно. На м/с Амбарчик наблюдалось уменьшение  $P$  до 113 мм (0.98%/год), особенно заметное в 2018 (55.9 мм). Рост  $P$  согласуется с выводами работы [10], в которой отмечен рост  $P$  для России в целом (2.1%/10 лет), с наиболее значительным трендом в районах Средней и Восточной Сибири (3.1–3.4%/10 лет). Представленные в [3] 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. Отмечается, что годовой прирост  $P$  обеспечивается их увеличением в холодный период (октябрь–май).

Анализ данных месячных величин  $P$  [23] в бассейнах Печоры и Колымы за 1966–2018 гг. позволил авторам статьи уточнить изменение  $P$  в зимний период (январь–апрель). В дельте Печоры (м/с Нарьян-Мар) зимние  $P$  за весь период

наблюдения росли со скоростью 0.25%/год (рис. 4, а), в 2008–2018 гг. – до 1.49%/год. Рассчитанные величины согласуются с данными, приведенными в [3], для которых характерен рост  $P$  в холодный период на 6.16 мм за 10 лет (1936–2009 гг.). В бассейне Колымы за 1966–2018 гг. отмечалось как незначительное увеличение зимних осадков, так и их снижение. Так, в ВД Колымы (м/с Черский) зимние  $P$  за 1966–2018 гг. слабо возрастали с интенсивностью 0.44%/год (рис. 4, б), в то время как на устьевом взморье (м/с Амбарчик) сокращались с интенсивностью 2.40%/год (рис. 4, в). Снижение  $P$  наблюдалось также в среднем течении Колымы (м/с Среднеколымск) и на притоке Мал. Анной (м/с Островное) – 1.51%/год и 2.08 %/год соответственно.

Полученные результаты расчетов согласуются с данными по России, приведенными в [20], где отмечается, что в 1976–2018 гг. изменение  $P$  на водосборах Печоры и Колымы происходят в диапазоне от –3 до 0% нормы, рассчитанной за 1961–1990 гг., при этом уменьшаются зимние и летние осадки (–3...–6%) и увеличиваются весенние (до +3%) и осенние (+3...+6%). Наш расчет зимних осадков в УО Колымы за 2008–2018 гг. по данным [15, 23] дает рост  $P$  с интенсивностью от 3.23 (м/с Амбарчик) до 6.11%/год (м/с Черский).

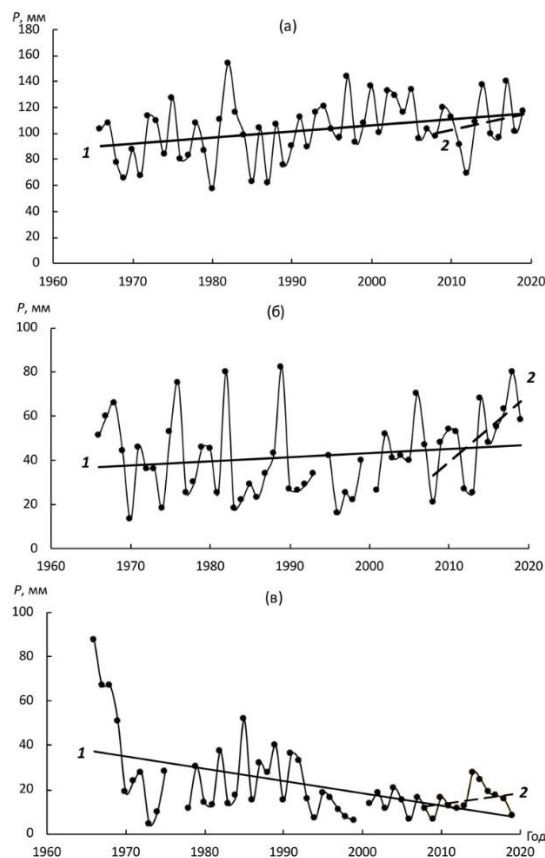


Рисунок 4. Многолетние изменения зимних осадков (январь–апрель) в дельтах Печоры (м/с Нарьян-Мар) (а) и Колыма (м/с Черский (б), Амбарчик (в)) за 1966–2018 (1) и 2008–2018 гг. (2).



Рост зимних  $P$  и толщины снежного покрова в среднем течении Колымы в 2008–2018 гг. (3.84%/год на м/с Среднеколымск) и на р. Мал. Анной (5.72%/год на м/с Островное) приводит к уменьшению зимнего промерзания и дает вклад в весенний расход воды в ВД, увеличивая приходную часть водного баланса дельты. Различие же в направленности и интенсивности изменений зимних  $P$  на м/с Черский по сравнению с другими м/с на Колыме возможно связано с недостаточной достоверностью и согласованностью данных, полученных из разных источников информации. Однако во всех источниках отмечается рост  $P$  ко второму десятилетию XXI в., что будет способствовать дальнейшему увеличению приходной части водного баланса дельт.

*Оценка  $\pm\Delta W_E$  в дельтах.* Величина испарения  $E$  в дельтах зависит от  $T$ , общей увлажненности и характера подстилающей поверхности. Оценка  $E$  требует данных детальных измерений, что затруднительно, особенно в субарктических дельтах. Поэтому в грубых оценочных расчетах водного баланса используется величина испаряемости  $E_0$  в дельтах. В литературе обычно приводятся диапазоны величины  $E_0$  – для района дельты Печоры 200–300 мм, дельты Колымы 100–200 мм. Авторы статьи использовали в расчетах максимальную величину  $E_0$ , характерную для исследуемых природных объектов – 300 мм для дельты Печоры и 200 мм для дельты Колымы, приведенную в [5, 19]. Таким образом рассчитанные по (3)  $\Delta W_E$  за различные периоды

времени дают величины 0.49–0.78 км<sup>3</sup>/год для дельты Печоры и 0.06–0.24 км<sup>3</sup>/год для дельты Колымы. А поскольку дельты Печоры и Колымы расположены в области достаточного увлажнения ( $P > E_0$ ,  $E_0/P = 0.61–0.67$ ), в данном случае речь идет не о потерях, а о климатически обусловленном добавлении стока воды в дельтах.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ СОСТАВЛЯЮЩИХ УРАВНЕНИЯ ВОДНОГО БАЛАНСА ДЕЛЬТ

Результаты расчета составляющих уравнения водного баланса дельт Печоры и Колымы для различных периодов времени представлены в табл. 3.

Расход воды реки, поступающий в ВД, отражает все процессы, происходящие на водосборе рек. Это главная приходная составляющая водного баланса крупной речной дельты. Климатические изменения на территории России приводят к росту расходов воды рек арктического побережья (Оби, Енисея, Лены, Оленека, Яны) от 0.02 до 1.40% величины  $Q_m$ . Расходы рек субарктического региона Северной Америки также увеличиваются, причем рост  $Q$  р. Маккензи за 1973–2011 гг. составляет 2.1% [11]. Среднегодовые  $Q$  Печоры и Колымы в ВД также растут. При этом оценка авторов статьи показала, что скорость увеличения  $Q$  не зарегулированной Печоры (0.2%/год), находящейся на западной границе распространения ММП в России, несколько меньше, чем у Колымы (0.26%/год), полностью протекающей в зоне сплошных ММП.

Таблица 3.

**Составляющие водного баланса дельт Печоры и Колымы за 1978–2018 гг. (обозначения соответствуют (4); величины  $P$  и  $E_0$  в мм/год; остальные – в км<sup>3</sup>/год; прочерк – отсутствие данных)**

Река	Период, годы	$W_Q$	$P$	$E_0$	$\Delta W_E$	$\Sigma W_i$	
						по (4)	по [4, 6]
Печора	1932–2018	135	477	300	0.78	135.8	–
	1978–2018	143	492	300	0.50	143.5	132–142
	1978–2007	141	491	300	0.49	141.5	–
	2008–2018	146	494	300	0.50	146.5	–
Колыма	1978–2018	123	220	200	0.06	123.1	124–125
	1978–2007	121	196	200	–0.01	121.0	–
	2008–2018	127	274	200	0.24	127.2	–

Примечания:  $W_Q$  – по г/п Оксина (Печора) и Колымское (Колыма);  $P$  – по м/с Нарьян-Мар (Печора) и Черский (Колыма).

Осадки в УО Печоры и Колымы за период наблюдений 1966–2018 гг. растут на всех станциях, кроме м/с Амбарчик, также увеличивая приходную часть уравнения водного баланса дельт обеих рек. Анализ изменчивости  $W_Q$  и  $P$  для дельт Печоры и Колымы в разные сезоны года в 2008–2018 гг. показал, что осенью, зимой и весной приходная часть баланса увеличивается, а летом – уменьшается. Дальнейшее возможное увеличение  $T$  и  $P$  в регионе, усиление таяния ММП и

возрастание площадей дельтовых озер будут способствовать росту потерь влаги на испарение в дельтах. Так, по данным [33], в центральной Аляске в настоящее время разница между растущими величинами  $P$  и  $E_0$  уменьшается (рост испаряемости преобладает над ростом осадков).

Оценка подземных составляющих уравнения водного баланса  $W_1$  и  $W_2$  дельт Печоры и Колымы довольно сложна и требует отдельных исследований. При этом  $W_1$  в уравнении баланса



может быть, как положительным, так и отрицательным [9]. Для дельт, расположенных в ММП, решающее значение во взаимодействии русловых потоков с подземными водами имеет геологическое строение дельтовой равнины и расположение таликов в дельте. Часть талой воды весной в результате инфильтрации поверхностного стока в грунты накапливается в растущих таликах под рукавами и крупными озерами. Часть воды возвращается в рукава дельты из озер через постоянные водотоки, часть остается в озерах, питая подозерные талики и расходясь на испарение. Исследования долей талого снега и дождевых осадков в стоке р. Колымы (2002–2004 гг.) подтверждают, что ~13% воды, образовавшейся при таянии снега, остается в дельте [34]. В то же время в дельте Колымы в результате повышения расходов и уровней воды зимой возможно наличие гидравлической связи с подмерзлотными пластами Северо-Колымского артезианского бассейна с аномально низким давлением, что может привести к инфильтрации речных вод и росту подземного питания [9].

#### ВЫВОДЫ

Многолетние изменения составляющих водного баланса дельт рек тесно связаны с изменчивостью климатических характеристик и увлажненности речного водосбора. Так в условиях роста среднегодовой температуры воздуха и осадков в субарктическом регионе отмечается явный рост величин основных составляющих водного баланса, в том числе водного стока исследуемых рек. В вершинах дельт рек Печоры и Колымы сток воды растет с интенсивностью 0.20 и 0.26%/год. Боковой приток вод (не учитывающийся, в частности, в данной статье) в современных климатических условиях также увеличивает приходную часть уравнения баланса рек водосбора Северного Ледовитого океана (пример – р. Пил, впадающая в Западный рук. дельты Маккензи).

Величина средней суммы осадков за период 1966–2018 гг. в ВД Печоры (м/с Нарьян-Мар) росла с интенсивностью 0.48%/год. Примерная оценка  $P$  в ВД Колымы (м/с Черский) дает интенсивность роста 0.42%/год, в то время как на морском побережье в бухте Амбарчик наблюдается тренд уменьшения осадков –0.98%/год. При недостатке данных наблюдений в дельте Колымы для прогноза изменения вклада  $P$  в водный баланс необходимо оценить возможность осреднения имеющихся данных по территории дельты.

Обнаружена тенденция к росту зимних многолетних  $P$  в ВД Печоры и Колымы, что дает вклад в приходную часть баланса дельты, а также уменьшает промерзание грунта и толщину льда на протоках. На водосборе Колымы (м/с Среднеколымск, Островное) зимние  $P$  уменьшаются в 1966–2018 гг. и растут в 2008–2018 гг.

Оценка подземной составляющей водного баланса ( $W_1$  и  $W_2$ ) дельт Печоры и Колымы и влияния на нее наличия ММП довольно сложна и

требует отдельных специальных исследований. Отмечается, что  $W_1$  в уравнении баланса исследуемых речных дельт может быть, как положительным, так и отрицательным. Повышение уровня воды в русле в зимний период (как, например, в результате регулирования стока Колымы) и увеличение подрусовых таликов может вызывать как рост поступления подземного стока в русло, так и разгрузку речного потока в подземные водоносные слои.

Потери воды в дельте  $\Delta W_E$  определяются стоком в приемный водоем, испарением и разгрузкой речных вод в подземные горизонты. Оценка величины  $\Delta W_E$  в дельтах Печоры и Колымы за весь период наблюдений дает +0.78 и +0.06 км<sup>3</sup>/год соответственно (в данном случае речь идет о климатически обусловленном добавлении стока воды), причем в последние годы (2008–2018 гг.) в дельте Печоры  $\Delta W_E$  снижается, а в дельте Колымы – растет.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (Тема № FMWZ-2022-0001).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) // <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 10.03.2021)
2. Алабян А.М., Василенко А.Н., Демиденко Н.А., и др. Приливная динамика вод в дельте Печоры в летнюю межень // Вест. Московского ун-та. Серия 5. География. 2022. № 1. С. 167–179.
3. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И. и др. Климатические изменения в Арктике и северной полярной области // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 1 (84). С. 67–80.
4. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек российской Арктики // Водное хозяйство России. 2015. № 1. С. 14–31.
5. Атлас мирового водного баланса. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 65 л.
6. Атлас: морфодинамика устьевых систем крупных рек арктического побережья России: Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. – М.: АПР, 2017. – 148 с.
7. Борщенко Е.В., Мишин Д.В., Ермакова Г.С., и др. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Печора. Москва–Иваново: ООО «ПресСто», 2021. 152 с.
8. Брызгалов В.А., Иванова И.М. Антропогенная трансформация гидролого-экологического состояния рек российской Арктики // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 3. С. 277–288.
9. Глотов В.Е., Глотова Л.П., Ушаков М.В. Ресурсы подземных вод в долине р. Колыма и их изменения при эксплуатации Колымской ГЭС // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2014. № 1. С. 20–27.

10. Джамалов Р.Г., Сафронова Т.И. Влияние многолетнемерзлых пород на формирование водных ресурсов Восточной Сибири (на примере отдельных рек Восточной Сибири) // Водные ресурсы. 2018. Том 45. № 4. С. 341–352.
11. Долгополова Е.Н., Исупова М.В. Условия формирования стока и гидролого-морфологических процессов в дельтах криолитозоны: дельты рек Лены и Маккензи // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 4. С. 1–17.
12. Климат городов мира: ежемесячные данные. Россия. Черский // <https://meteoinfo.ru/climatecities?p=1414> (дата обращения 02.09.2021)
13. Кравцова В.И., Миткиных Н.С. Устья рек России. Атлас космических снимков. М.: Научный мир, 2013. 124 с.
14. Магрицкий Д.В. Антропогенные воздействия на сток рек, впадающих в моря российской Арктики // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 3–16.
15. Месячные и годовые суммы выпавших осадков в Черском // [http://www.pogodaiklimat.ru/history/25123\\_2.htm](http://www.pogodaiklimat.ru/history/25123_2.htm) (дата обращения 04.10.2021)
16. Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС. 1997. 176 с.
17. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
18. Михайлов В.Н. Влияние дельт на среднегодовое водный сток рек // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 4. С. 389–394.
19. Михайлов В.Н., Исупова М.В., Магрицкий Д.В. Водный баланс крупнейших дельт мира // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2001. № 5. С. 3–8.
20. Нормы и тренды температуры и осадков для регионов России, ФГБУ «Институт глобального климата и экологии им. Академика Ю.А. Израэля» <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 01.04.2021)
21. Реки и озера мира. Энциклопедия. М.: ООО «Издательство «Энциклопедия». 2012. 928 с.
22. Ушаков М.В. Влияние Колымской ГЭС и климатических изменений на гидрологический режим р. Колыма // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2013. № 2. С. 20–24.
23. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) // <http://meteo.ru/> (дата обращения: 11.06.2021)
24. Arctic RIMS (Regional, Integrated Hydrological Monitoring System for Pan-Arctic Land Mass) <http://rims.unh.edu/data/station/list.cgi?col=1> (дата обращения 26.10.2020)
25. Brown J., Ferrians Jr. et al. 2001. Circum-arctic map of permafrost and ground ice conditions. Boulder CO: National Snow and Ice Data Center /World Data Center for Glaciology. Available at: <https://data.basin.org/datasets/> (дата обращения 17.03.2021)
26. Hansen J., Sato M., Kharecha P. et al. Young people's burden: Requirement of negative CO2 emissions // Earth Syst. Dynam. 2017. V. 8. P. 577–616.
27. Meredith M., Sommerkorn M., Cassotta S., et al. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. 2019. In press. <https://www.ipcc.ch> (дата обращения: 18.10.2021).
28. Piliouras, A., Rowland, J.C. Arctic river delta morphologic variability and implications for riverine fluxes to the coast // J. of Geophysical Research: Earth Surface. 2020, 125. doi.org: 10.1029/2019JF005250
29. Shiklomanov A.I., Holmes R.M., McClelland J.W., et al. Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset, Version 2020 // <https://www.arcticrivers.org/data> (дата обращения 26.04.2021).
30. Suzuki K., Hiyama T., Matsuo K., et al. Accelerated continental-scale snowmelt and ecohydrological impacts in the four largest Siberian River basins in response to spring warming // Hydrological Processes. 2020. V. 34. P. 3867–3881.
31. The official website of the Government of Canada <https://wateroffice.ec.gc.ca> (дата обращения 21.09.2021)
32. Walker H.J., Hudson P.F. Hydrologic and geomorphic processes in the Colville River delta, Alaska // Geomorphology. 2003. V. 56. P. 291–303. doi:10.1016/S0169-555X(03)00157-0
33. Walvoord M.A., Striegl R.G. Increased groundwater to stream discharge from permafrost thawing in the Yukon River basin: Potential impacts on lateral export of carbon and nitrogen // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. L12402. doi:10.1029/2007GL030216
34. Welp L.R., Randerson J.T., Finlay J.C., et al. A high-resolution time series of oxygen isotopes from the Kolyma River: Implications for the seasonal dynamics of discharge and basin-scale water use // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32. doi:10.1029/2005GL022857