

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.542

### СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА ДЕЛЬТ ПЕЧОРЫ И КОЛЫМЫ В УСЛОВИЯХ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА<sup>1</sup>

© 2023 г. Е. Н. Долгополова<sup>а</sup>, \*, М. В. Исупова<sup>а</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

\*e-mail: [dolgopolova@gmail.com](mailto:dolgopolova@gmail.com)

\*\*e-mail: [misupova@yandex.ru](mailto:misupova@yandex.ru)

Поступила в редакцию 17.03.2020 г.

После доработки 26.09.2022 г.

Принята к публикации 04.10.2022 г.

Проведено сравнение многолетних изменений составляющих водного баланса дельт рек Печоры и Колымы, протекающих 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.). Отмечен явный рост величин основных составляющих водного баланса, особенно заметный в 2008–2018 гг.

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

**DOI:** 10.31857/S0321059623020049, **EDN:** IPQKME

#### ВВЕДЕНИЕ

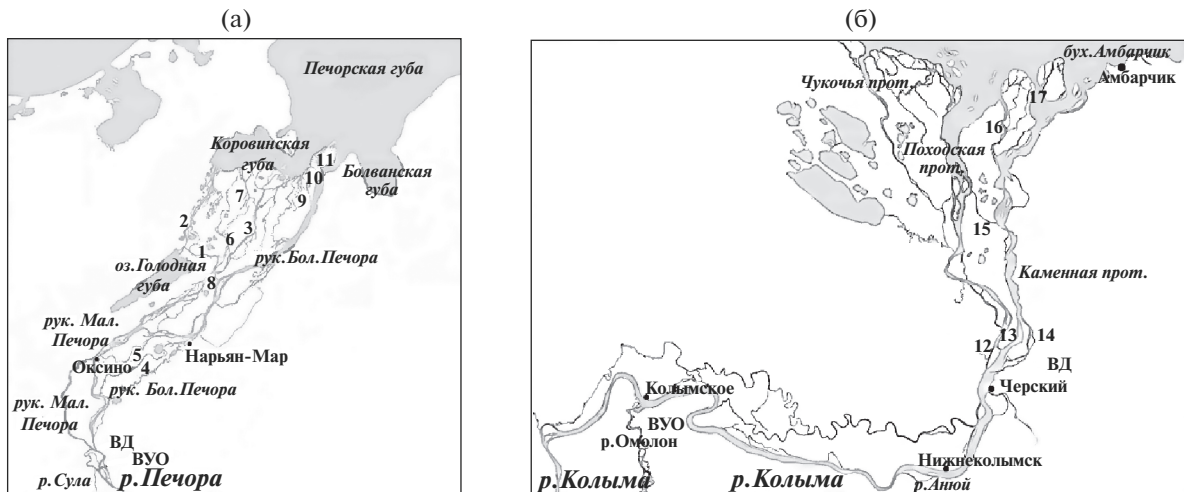
В настоящее время режим устьев рек субарктического региона заметно меняется в результате потепления климата. Повышение среднегодовой температуры воздуха  $T$  за последние сто лет к концу первого двадцатилетия XXI в. составило  $1.17^{\circ}\text{C}$  по сравнению с осредненной за 1880–1920 гг. (так называемый доиндустриальный период), причем максимальное увеличение на  $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$  наблюдалось в субарктических областях Северной Америки и России [26]. Изменение режима  $T$  и осадков  $P$  в свою очередь влияет на величину водозапаса снежного покрова на водосборах крупных рек данного региона (Оби, Енисея, Лены и Колымы) – одного из основных факторов увеличения стока этих рек в Северный Ледовитый океан [30]. Работы, посвященные исследованиям изменения расхода воды в речных устьях субарктического региона, свидетельствуют об устойчивом росте водного стока рек этого района 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 увеличению 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 большой 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 частые оползни приводят 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 островного (Печора) и сплошного (Колыма) распространения ММП.

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0001).



**Рис. 1.** Картограммы устьев Печоры (а) и Колымы (б). Рукава: 1 – Утчер шар, 2 – Тундровый шар, 3 – Средний шар, 4 – Городецкий шар, 5 – Голубковский шар, 6 – Крестовый шар, 7 – Болдин шар, 8 – Месин, 9 – Глубокий шар, 10 – Каменный шар, 11 – Неволин шар, 12 – Черноусовская прот., 13 – Мархьяновская прот., 14 – Таловая прот., 15 – Первая Поперечная прот., 16 – Селивановская прот., 17 – Вторая Поперечная протока, ВД – вершина дельты, ВУО – вершина устьевой области.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Устьевая область (УО) Печоры (рис. 1а) общей площадью 10,7 тыс. км<sup>2</sup> относится к эстуарно-дельтовому и включает в себя приливный широкопойменный устьевой участок реки (длиной 70 км), многорукавную дельту выполнения (площадью 2590 км<sup>2</sup> [13]) и отмелое полузакрытое устьевое взморье – Печорскую губу Баренцева моря (площадью  $F_d$  5240 км<sup>2</sup> [13]). Вершина устьевой области Печоры расположена в районе впадения притока Сулы (в месте выклинивания приливных колебаний уровня воды в межень), а вершина дельты (ВД) – в месте разделения реки на крупные рукава Большая Печора 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. Большая Печора расположен обширный Печорский бар, главные бороздины которого судоходны. Основные гидролого-морфометрические характеристики дельты представлены в табл. 1.

Климатические условия в дельте характеризуются наличием продолжительного холодного сезона с ноября по апрель. Среднегодовая температура воздуха  $T$  в г. Нарьян-Мар  $-3.2^{\circ}\text{C}$  (от  $-17.1^{\circ}\text{C}$  в феврале до  $+16^{\circ}\text{C}$  в июле). Годовое количество осадков 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, основанным на материалах

Международного центра данных по снегу и льду [25], 6% протяженности водотоков дельты приходится на сплошные ММП. В дельте множество термокарстовых озер (коэффициент озерности на территории Ненецкого автономного округа составляет 3.51%). Характерны тундровые и лесотундровые ландшафты, низменные участки дельты и острова заболочены.

Печора относится к рекам с весенним половодьем (преимущественно снеговое питание), осенними паводками и низкой зимней меженью. Среднемноголетний расход воды  $Q_m$  на г/п Оксина (в ~40 км ниже ВД и 141 км от МКД) составляет, по разным данным, от 4120 (сток воды  $W_Q$  130 км<sup>3</sup>/год) [13, 17] до 4402 м<sup>3</sup>/с [7]. Авторами статьи рассчитана величина  $Q_m$  за 1932–2018 гг., согласно [1, 20], равная 4230 м<sup>3</sup>/с (134 км<sup>3</sup>/год). Свыше 56% годового стока приходится на период весеннего половодья (май–июнь).

По состоянию на 1977–1987 гг. сток воды в ВД распределялся между рукавами Большая Печора и Малая Печора относительно равномерно (в межень соответственно по 42.2 и 47.3% стока в ВД) [7, 17], остальной сток поступал в рукава Голубковский Шар и Городецкий Шар. В системе рук. Малая Печора основной сток распределялся в рукава Месин (24.4% стока в ВД) и Средний Шар (17.5%). Ближе к МКД доля стока рук. Большая Печора существенно возрастала (до 75.2% стока в ВД), водный поток сосредотачивался в этом рукаве. В настоящее время, по данным [7], в межень в Большой Печоре сосредотачивается до 37.1% водного стока в ВД, а в Малой Печоре – до 50.7%. В приморской части дельты на перерас-

**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
Среднегодовое количество воды в ВД $Q_m$ , м <sup>3</sup> /год	4120–4230	3320–3960
Среднегодовое количество стока воды в ВД $W_Q$ , км <sup>3</sup> /год	130–133	105–125
Средний максимальный расход воды $Q_{max}$ , м <sup>3</sup> /с	23000	17200
Средний минимальный 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 (половодье)	–
обратных течений в прилив	80	–
нагонов	150–160	282
осолоненных вод	~10	–

пределение стока воды в водотоках и на обводнение ее западной части оказывают влияние реверсивные течения, формирующиеся в водотоках по мере продвижения в дельту приливной волны, особенно заметные в межень [2].

Сток взвешенных наносов в устье Печоры составляет 6.4–8.5 млн т/год (90% в половодье). Наиболее активно в Печорскую губу выдвигается конус выноса рук. Большая Печора. Большинство остальных небольших рукавов – отмирающие. Коровинская губа постепенно заполняется речными наносами [13, 17].

Несмотря на суровые климатические условия, заболоченность, наличие ММП, затрудняющих освоение природных ресурсов дельты Печоры, УО испытывает существенную антропогенную нагрузку – нефтегазовый комплекс (Тимано-Печорская нефтегазовая провинция), судоходство (крупный морской порт Нарьян-Мар), рыболовство, животноводство, оленеводство.

УО Колымы относится к дельтово-эстуарному типу и включает устьевой участок реки (длиной

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 притока Омолон (предельная дальность распространения нагонов), а ВД – в ~10 км ниже пос. Черского (~120 км от МКД) в месте разделения реки на протоки Каменную (главный судоходный рукав) и Черноусовскую (ниже слияния с прот. Мархаяновской – Походской) (рис. 1б). Ниже по течению от прот. Походской отходит влево прот. Чукочь, впадающая в море. 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°С (от –37.9°С в январе до +11.5°С в июле). Годовая сумма осадков ~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). Река зарегулирована, в ее верхнем течении (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.

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 ≤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), при этом отмечается незначительный тренд к увеличению – 0.3%/год. Сток воды в дельте в конце XX в. распределялся между основными рукавами – Каменной и Походской протоками – в равных долях, соответственно ~59 и 41% стока в ВД [17]. Ниже по течению доля стока прот. Каменной снижается (до 38.9%) вследствие оттока воды в боковые протоки, достигая в устье магистрального рукава 29% стока в ВД. Доля стока прот. Походской немного увеличивается (до 42.5%) за счет впадения в нее боковых проток, вытекающих из Каменной.

Сток взвешенных наносов в устье Колымы составляет 11.7–15.8 млн т/год [4, 17]. После зарегулирования Колымы мутность ее воды ниже ГЭС существенно уменьшилась, а сток взвешенных наносов нижней Колымы сократился до 7.4 млн т/год [4].

Колыма судоходна на протяжении 1840 км от места впадения р. Бахапчи (Бахапча) (ниже Колымской ГЭС) до устья (бух. Амбарчик). Основные отрасли хозяйства в УО – водный транспорт, оленеводство, рыболовство, “зимник” в период ледостава, на водосборе – добыча угля (разрез “Зырянский”), производство электроэнергии (Колымская и Усть-Среднеканская ГЭС). Согласно [8], антропогенное воздействие на дельту Колымы оценивается как равновесное.

## МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

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

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

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

$$W_Q + W_l + P = \Sigma W_i + E \pm \Delta W. \quad (2)$$

При рассмотрении водного баланса дельт за многолетний период величину  $\pm \Delta W$  принимают равной 0.  $W_l$  для больших дельт, как правило, очень мал по сравнению с  $W_Q$ . Для крупных дельт, у которых  $W_Q \gg W_l$ , особенно в случае отсутствия репрезентативных данных измерений бокового притока, величиной  $W_l$  можно пренебречь [16].  $P$  определяется по данным метеостанций в дельте или по картам распределения осадков. Основные сложности возникают при расчетах испарения.

Для оценки водного баланса дельты можно воспользоваться гидрометеорологическим методом, основанным на сравнении количества осадков, выпавших на поверхность дельты, с потерями на испарение с учетом характера дельтовых ландшафтов. При отсутствии данных специальных наблюдений за удельным испарением с каждого вида дельтового ландшафта  $E$  оценивают по зональной величине испаряемости  $E_0$  [18]. Тогда разницу между поступлениями влаги в дельту за счет осадков и ее убылью за счет испарения ( $\Delta W_E$ , км<sup>3</sup>/год) можно рассчитать по формуле:

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

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

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

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

**Таблица 2.** Составляющие водного баланса и изменения водного стока основных субарктических дельт рек России по [19]

Река	$F_d, \text{км}^2$	Климатические значения по [5], мм/год			$E_0/P$	$P - E_0, \text{мм}$	$W_Q, \text{км}^3/\text{год}$	$\Delta W, \text{км}^3/\text{год}$
		$P$	$E$	$E_0$				
Северная Двина	900	700	350	400	0.70	300	108	0.27
Печора	2590	600	250	300	0.50	300	128	0.78
Обь	3930	500	250	300	0.50	200	403	0.79
Енисей	7100	450	200	220	0.49	230	625	1.63
Лена	29300	300	135	150	0.50	150	530	4.40
Яна	8200	290	155	180	0.62	110	33.8	0.90
Индибирка	7650	270	160	180	0.67	90	50.5	0.69
Колыма	3250	300	180	200	0.67	100	103	0.32

Для расчетов гидрометеорологических параметров устьев рек использованы данные, представленные в [1, 5, 12, 15, 20, 23, 24, 29]. Временные интервалы многолетних изменений составляющих водного баланса обусловлены наличием в [1, 12, 15, 20] репрезентативных данных, полученных как за весь период инструментальных наблюдений, так и в настоящее время (2008–2018 гг.).

### ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА ДЛЯ ДЕЛЬТ 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 Северной 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 (табл. 2). Наибольший вклад в приходную часть баланса дельт, как правило, вносит речной сток.

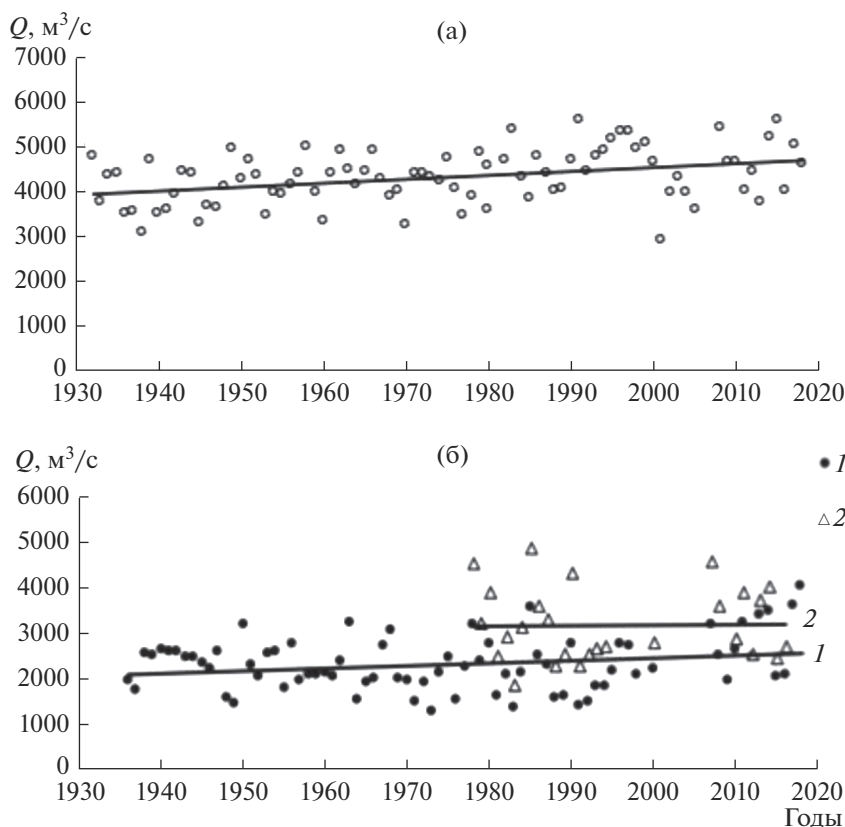
#### Речной и местный сток

Как 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. 2а). Согласно данным, представленным в [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 средние  $Q_{\max}$  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, равная 142 км<sup>3</sup>/год, которую можно принять за  $\Sigma W_i$  в формулах (1, 2).

После строительства плотины ГЭС в 1978 г. воды р. Колымы потекли по искусственному тоннелю у пос. Синегорье и начались постоянные измерения  $Q$  в замыкающем створе на г/п Колымское. В период 1978–2018 гг. коэффициент корреляции  $R$  между величинами  $Q_m$  на г/п Среднеколымск и Колымское составлял 0.95. Данные о расходах на г/п Колымское начиная с 2009 г. – восстановленные по измерениям на г/п Среднеколымск [29]. Коэффициент  $R$  измеренных значений  $Q_m$  на г/п Среднеколымск и Колымское в 1978–2008 гг. равен 0.98. Среднегодовой  $Q$  на г/п Колымское за 1978–2018 гг. увеличивался с интенсивностью 0.26%/год (рис. 2б) при  $Q_m = 3320$  м<sup>3</sup>/с (105 км<sup>3</sup>/год). С учетом водного стока правого притока Анюя (580 м<sup>3</sup>/с, 18.3 км<sup>3</sup>/год [21]), выпадающего в Колыму в 105 км ниже г/п Колымское, в ВД Колымы  $Q_m = 3900$  м<sup>3</sup>/с (123 км<sup>3</sup>/год).

На г/п Среднеколымск (в 641 км от МКД и 1203 км ниже Колымской ГЭС) величина  $Q_m$  Колымы составляет 2321 м<sup>3</sup>/с по наиболее длинному ряду наблюдений – за 1936–2018 гг. За весь период наблюдений отмечается рост  $Q$  Колымы с интенсивностью 0.24%/год (рис. 2б). При этом в условиях естественного водного режима в 1936–1978 гг. ( $Q_m = 2240$  м<sup>3</sup>/с) расход воды уменьшался с интенсивностью ~0.24%/год. После ввода в строй в 1982 г. первого и второго агрегатов ГЭС



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

интенсивность роста  $Q$  увеличилась до 0.93%/год за 1982–2016 гг. при  $Q_m = 2340 \text{ м}^3/\text{с}$ . В 2008–2018 гг. также наблюдается рост  $Q$  Колымы (г/п Среднеколымск) при  $Q_m = 2860 \text{ м}^3/\text{с}$ , а средние  $Q_{\max}$  и  $Q_{\min}$  летний и зимний за этот период также увеличились (табл. 1) и составили, по данным [1], 19800, 1740 и 350  $\text{м}^3/\text{с}$  соответственно. Рассчитанные авторами статьи величины  $Q_m$  и  $W_Q$  Колымы в ВД близки к приведенным в [4, 6] значениям 3320  $\text{м}^3/\text{с}$  и 104  $\text{км}^3/\text{год}$ . В [6] отмечено возрастание расхода воды до 3930  $\text{м}^3/\text{с}$  (124  $\text{км}^3/\text{год}$ ) в дельте при приближении к МКД.

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, представленным в [29], составила 772.2  $\text{м}^3/\text{с}$  (24.4  $\text{км}^3/\text{год}$ , или  $\sim 19\% W_Q$ ), причем отмечался слабый рост зимнего стока с интенсивностью 0.5–0.7%/год. Коэффициент корреляции между величинами среднегодового и зимнего  $Q$  составляет  $\sim 0.6$ . Поскольку, согласно климатиче-

ским 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  $\text{км}^3/\text{год}$ .

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

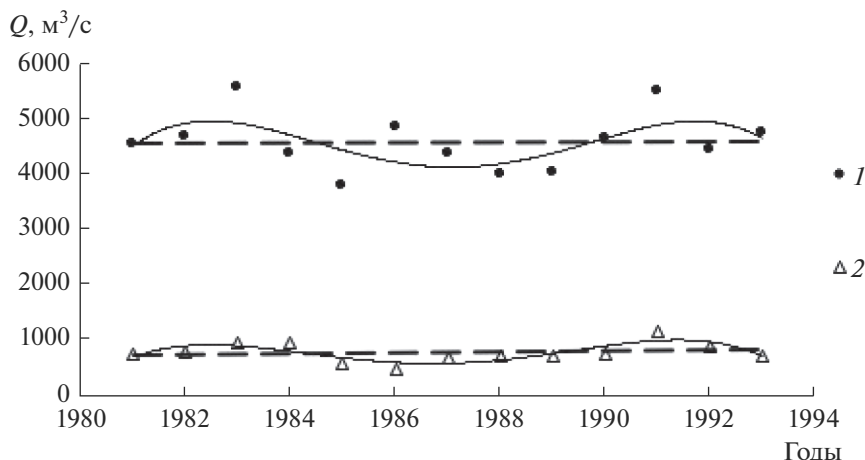


Рис. 3. Изменения среднегодового (1) и подледного (2) расхода воды р. Печоры на г/п Оксино за 1981–1993 гг. (линии тренда: сплошная – полиномиальный, штриховая – линейный).

$W_l \sim 22 \text{ км}^3/\text{год}$ , причем рост  $Q$  невелик и составляет  $\sim 0.02\%/ \text{год}$ . Таким образом, можно ожидать рост  $W_l$  наряду с  $W_o$  с сохранением соотношения  $W_l \ll W_o$ , что незначительно увеличит приходную часть уравнения водного баланса.

*Осадки*

Для субарктического региона характерен быстрый рост среднегодовой температуры воздуха  $T$  [3, 10, 20]. В [10] указан положительный тренд изменения  $T$  за 1976–2015 гг.:  $>0.72^\circ\text{C}/10$  лет в Восточной Сибири и  $>0.45^\circ\text{C}/10$  лет по России в целом. В [3] приведен рассчитанный относительно нормы за 1961–1990 гг. общий рост  $T$  для широтной зоны  $60\text{--}70^\circ$  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. на  $0.35^\circ\text{C}/10$  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 проанализированы представленные в [23] данные о количестве осадков  $P$  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 (февраль–март) осадков.

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

тренд увеличения (табл. 3). При этом в 2008–2019 гг. (2008–2018 гг.) рост  $P$  наблюдался на всех метеостанциях, за исключением расположенной в бух. Амбарчик (устьевое взморье Колымы). Так, на м/с Печора (в  $\sim 600$  км выше ВД) и Нарьян-Мар годовая сумма возросла до 636 мм ( $0.37\%/ \text{год}$ ) и 494 мм ( $0.48\%/ \text{год}$ ) соответственно, а на м/с Среднеколымск, Островное (в 139 км юго-восточнее ВД Колымы) и Черский – до 255 мм ( $0.41\%/ \text{год}$ ), 245 мм ( $0.07\%/ \text{год}$ ) и 274 мм ( $0.42\%/ \text{год}$ ) соответственно. На м/с Амбарчик наблюдалось уменьшение  $P$  до 113 мм ( $0.98\%/ \text{год}$ ), особенно заметное (55.9 мм) в 2018 г. 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 ( $3.1\text{--}3.4\%/10$  лет). Представленные в [3] многолетние изменения  $P$  в Арктике в 1936–2009 гг., осредненные по широтной зоне  $60\text{--}70^\circ$  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 в [23] месячных величин  $P$  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 наблюдений росли со скоростью  $0.25\%/ \text{год}$  (рис. 4а), в 2008–2018 гг. – до  $1.49\%/ \text{год}$ . Рассчитанные величины согласуются с данными, приведенными в [3], для которых характерен рост  $P$  в холодный период на  $6.16 \text{ мм}/10$  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 величины  $P$  за 1966–2018 гг. слабо возрастали с интенсивностью  $0.44\%/ \text{год}$  (рис. 4б), в то время

**Таблица 3.** Многолетние изменения годовых сумм осадков  $P$  в бассейнах Печоры и Колымы

Река	Метеостанция	$P$ , мм		Уравнение линейного тренда (1966–2018 гг.)	Коэффициент аппроксимации $r^2$
		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

как на устьевом взморье (м/с Амбарчик) они сокращались с интенсивностью 2.40%/год (рис. 4в). Снижение  $P$  наблюдалось также в среднем течении Колымы (м/с Среднеколымск) и на притоке Малый Анюй (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. изменения  $P$  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%). Расчет авторами статьи 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). 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. Малый Анюй (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 направленности и интенсивности изменений зимних  $P$  на м/с Черский по сравнению с другими станциями на Колыме, возможно, связано с недостаточной достоверностью и согласованностью данных, полученных из разных источников. Однако во всех источниках отмечено увеличение  $P$  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 использует-

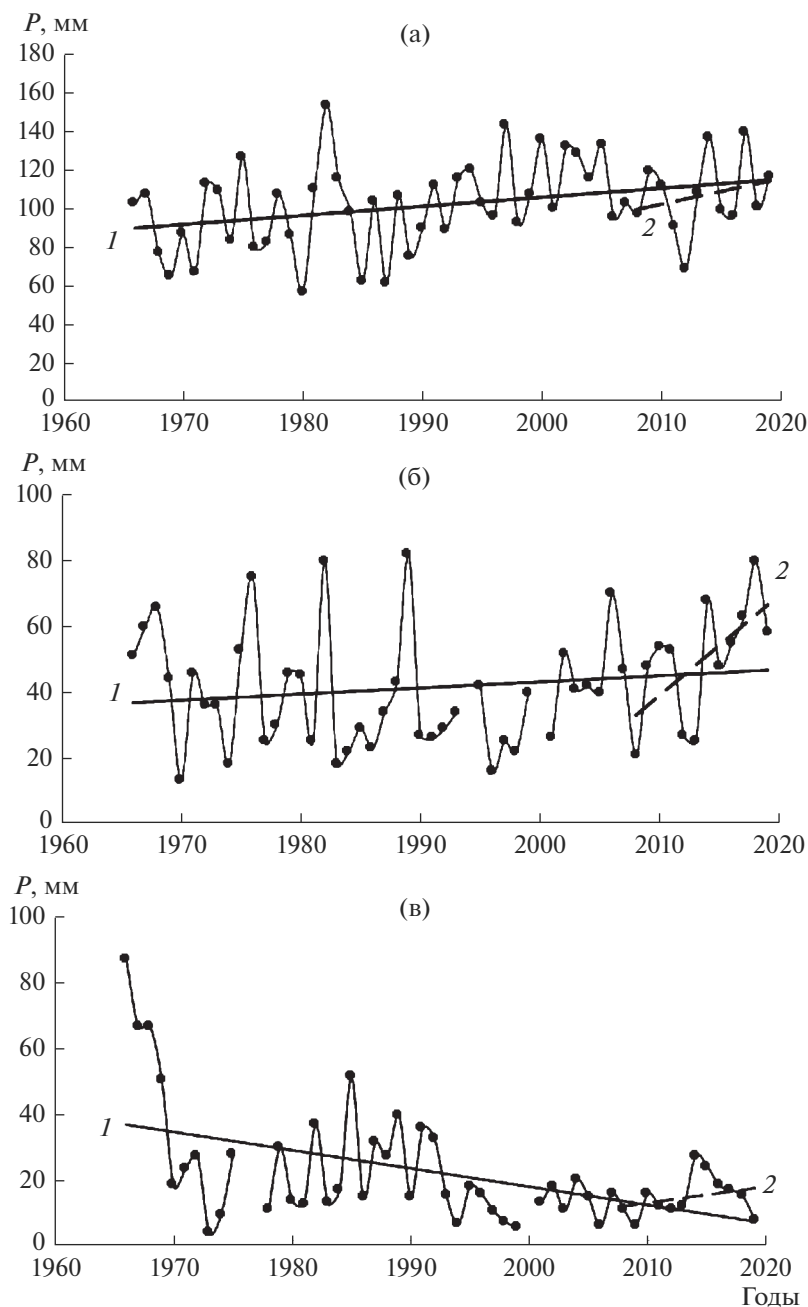
ся величина испаряемости  $E_0$  в дельтах. В литературе обычно приводятся диапазоны величины  $E_0$  – для района дельты Печоры 200–300 мм, дельты Колымы 100–200 мм. Авторы статьи использовали в расчетах максимальную величину  $E_0$ , характерную для исследуемых природных объектов, – 300 мм для дельты Печоры и 200 мм для дельты Колымы, что приведено в [5, 19]. Таким образом, рассчитанные по (3)  $\Delta W_E$  за разные 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 водного баланса дельт Печоры и Колымы для разных периодов времени представлены в табл. 4.

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  $Q_m$ . Расход рек субарктического региона Северной Америки также увеличивается, причем рост  $Q$  р. Маккензи за 1973–2011 гг. составляет 2.1% [11]. Среднегодовые  $Q$  Печоры и Колымы в ВД также растут, причем оценка авторов настоящей статьи показала, что скорость увеличения  $Q$  не зарегулированной Печоры (0.2%/год), находящейся на западной границе распространения ММП, несколько меньше, чем у Колымы (0.26%/год), протекающей в зоне сплошных ММП.





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

Количество осадков в УО Печоры и Колымы за период наблюдений 1966–2018 гг. растет 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 мерзло-

ты и рост площадей дельтовых озер будут способствовать возрастанию потерь влаги на испарение в дельтах. Так, например, в центральной Аляске разница между растущими величинами  $P$  и  $E_0$  в последние годы уменьшается, т. е. увеличение испаряемости преобладает над ростом количества осадков [33].

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

**Таблица 4.** Составляющие водного баланса дельт Печоры и Колымы за 1978–2018 гг. (обозначения соответствуют (4);  $P$  и  $E_0$  – мм/год; остальные – км<sup>3</sup>/год; прочерк – отсутствие данных;  $W_Q$  – по г/п Оксина (Печора) и Колымское (Колыма);  $P$  – по м/с Нарьян-Мар (Печора) и Черский (Колыма))

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	–

этом  $W_1$  в уравнении баланса может быть как положительным, так и отрицательным [9]. Для дельт, расположенных в ММП, во взаимодействии русловых потоков с подземными водами решающее значение имеют геологическое строение дельтовой равнины и расположение таликов в дельте. Весной в результате инфильтрации поверхностного стока в грунты часть талой воды 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 расходуясь 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 ВД рек Печоры и Колымы сток воды растет с интенсивностью 0.20 и 0.26%/год. Местный приток вод, не учитывающийся, в частности, для рассматриваемых рек, в современных климатических условиях также увеличивает приходную

часть уравнения баланса рек водосбора Северного Ледовитого океана (пример – р. Пил, впадающая в рук. Западный дельты Маккензи).

Средняя сумма 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 бух. 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 роста 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) в период 1966–2018 гг. зимние  $P$  уменьшаются, а в 2008–2018 гг. растут.

Оценка подземных составляющих водного баланса ( $W_1$  и  $W_2$ ) дельт Печоры и Колымы и влияния на нее наличия ММП довольно сложна и требует отдельных специальных исследований. Стоит отметить, 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 могут вызывать как рост поступления подземного стока в русло, так и разгрузку речного потока в подземные водонесные 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс]. <https://gmvo.skniihv.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. Сер. 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 // Вод. хоз-во России. 2015. № 1. С. 14–31.
5. Атлас мирового водного баланса. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 65 л.
6. Атлас: морфодинамика устьевых систем крупных рек арктического побережья России. 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. М.; Иваново: ПресСто, 2021. 152 с.
8. Брызгалов В.А., Иванова И.М. Антропогенная трансформация гидролого-экологического состояния рек российской Арктики // Вод. 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. Геокриология. 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) // Вод. ресурсы. 2018. Т. 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 // Вод. ресурсы. 2021. Т. 48. № 4. С. 1–17.
12. Климат городов мира: ежемесячные данные. Россия. Черский [Электронный ресурс]. // <https://meteoinfo.ru/climatcities?p=1414> (дата обращения: 02.09.2021)
13. Кравицова В.И., Митькиных Н.С. Устья рек России. Атлас космических снимков. М.: Науч. мир, 2013. 124 с.
14. Магрицкий Д.В. Антропогенные воздействия на сток рек, впадающих в моря российской Арктики // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 3–16.
15. Месячные и годовые суммы выпавших осадков в Черском [Электронный ресурс]. [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 среднемноголетний водный сток рек // Вод. 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. [Электронный ресурс]. <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.: Энциклопедия, 2012. 928 с.
22. Ушаков М.В. Влияние Колымской ГЭС и климатических изменений на гидрологический режим р. Колыма // Вестн. 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) [Электронный ресурс]. <http://meteo.ru/> (дата обращения: 11.06.2021)
24. Arctic RIMS (Regional, Integrated Hydrological Monitoring System for Pan-Arctic Land Mass) [Электронный ресурс]. <http://rims.unh.edu/data/station/list.cgi?col=1> (дата обращения: 26.10.2020)
25. Brown J., Ferrians Jr. Circum-arctic map of permafrost and ground ice conditions. Boulder CO: National Snow and Ice Data Center / World Data Center for Glaciology. 2001. [Электронный ресурс]. <https://databasin.org/datasets/>
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. [Электронный ресурс]. <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. Geophys. Res. Earth Surface. 2020. V. 125. e2019JF005250. [Электронный ресурс]. <https://doi.org/10.1029/2019JF005250>
29. Shiklomanov A.I., Holmes R.M., McClelland J.W. et al. Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset. Version 2020-12-24. 2020. [Электронный ресурс].

- <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 // *Hydrol. Processes*. 2020. V. 34. P. 3867–3881.
31. The official website of the Government of Canada. [Электронный ресурс]. <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 // *Geomorphol.* 2003. V. 56. P. 291–303.
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 // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L12402.  
<https://doi.org/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 // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32.  
<https://doi.org/10.1029/2005GL022857>