

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.54:551.468(282.243.7)

### УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА И ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДЕЛЬТАХ КРИОЛИТОЗОНЫ: ДЕЛЬТЫ РЕК ЛЕНЫ И МАККЕНЗИ<sup>1</sup>

© 2021 г. Е. Н. Долгополова<sup>a, \*</sup>, М. В. Исупова<sup>a, \*\*</sup>

<sup>a</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 30.12.2019 г.

После доработки 26.01.2020 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

Исследован гидрологический режим дельт рек Лены и Маккензи, расположенных в зоне многолетнемерзлых пород разных типов. Выявлены свойственные устьям субарктической области черты. Исследован транспорт наносов в обеих дельтах и вынос материала в море Лаптевых и Бофорта. Приведены характеристики мерзлых пород и обсуждены их изменения при современном росте температуры воздуха. Отмечена возможность влияния оттаивания многолетнемерзлых пород при потеплении климата на величину стока воды и наносов в арктических дельтах.

**Ключевые слова:** дельта, криолитозона, Лена, Маккензи, сток воды, перенос наносов, морфологические процессы.

**DOI:** 10.31857/S0321059621040040

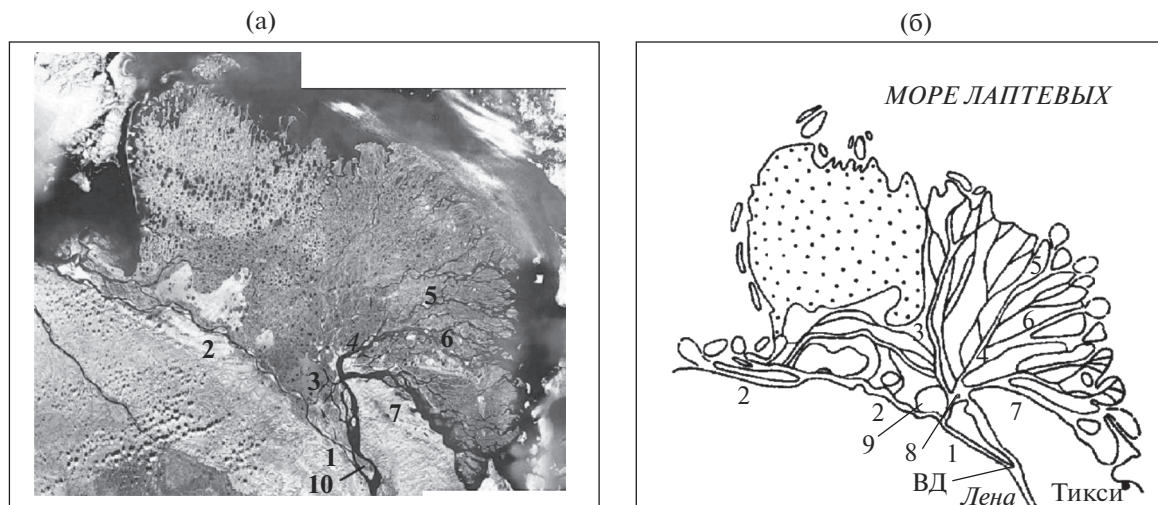
Исследование устьев рек, впадающих в моря Северного Ледовитого океана, вызывает большой интерес как в связи с освоением территорий, прилегающих к устьям, и добычей углеводородов, так и с желанием человека сохранить уникальные экосистемы, сформировавшиеся в этих устьях. Кроме того, современное изменение климата, приводящее к росту среднегодовых значений температуры воздуха на Земле, в прибрежных районах Арктики вызывает изменение ледовой ситуации и режима осадков, увеличение глубины оттаивания многолетнемерзлых пород (ММП) и деструктивные процессы на территории, что также сказывается на режиме арктических устьев [34, 42, 44, 51]. Изменение свойств ММП вызывает существенные переформирования долин и устьев рек в криолитозоне.

Неустойчивость субарктических геосистем, обусловленная развитием криогенных процессов и особенностями вертикальной структуры мерзлых грунтов, определяется изменениями климата, морскими трансгрессиями и регрессиями, а также интенсивностью освоения земель человеком. В этих условиях ведущий процесс изменения ландшафтной структуры — термокарст. С ростом

температуры воздуха сплошные ММП превращаются в прерывистые, далее — в островные вплоть до исчезновения мерзлых грунтов, что приводит к сдвигу южной границы распространения ММП к С. Однако взаимодействие речных и морских вод в устьях рек способствует не только сохранению, но и образованию ММП, о чем свидетельствует возникновение сезонномерзлых грунтов в устьевых областях арктических рек. В [12, 21, 25] отмечено, что при взаимодействии морских и пресных речных водных масс в устьях арктических рек могут возникать придонные течения в сторону суши (эстуарная циркуляция), с которыми в устья рек может поступать морская вода с отрицательной температурой, что в свою очередь вызывает замерзание промытых пресной водой осадков и образование сезонно-мерзлых грунтов.

Устья рек — индикаторы всех процессов, происходящих в реке и ее долине выше по течению. На режим устьев влияют многие факторы, основные из них: речные (сток воды и наносов, уровни воды в реке и др.), морские (уровень воды в океане, течения, приливы, волнение и др.) геологические, физико-географические (климат, рельеф, почвенно-растительный покров) и антропогенные. Эти факторы, различные для разных устьев, существенно меняются в разные периоды даже в пределах одной устьевой области. Так, увеличение объема атмосферных осадков и активное тая-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 0147-2019-0001, государственная регистрация АААА-А18-118022090056-0).



**Рис. 1.** Карта (а) и схема (б) дельты Лены по [17, 56]. Рукава и протоки: 1 – Булкурская, 2 – Оленекская, 3 – Туматская, 4 – Трофимовская, 5 – Большая Трофимовская, 6 – Сардахская, 7 – Быковская; острова: 8 – Столб, 9 – Самойловский, 10 – Тит-Ары. Здесь и на рис. 2 ВД – вершина дельты.

ние ММП в бассейнах рек вызывают повышенный расход воды в арктических устьях, а рост температуры воздуха – увеличение испарения; увеличение глубины протаивания ММП на территории бассейна реки приводит к росту стока мелкодисперсных наносов в вершине дельты; активизация разрушения берегов в много рукавной дельте – переформирование дельтовых рукавов, прорывы и быстрое изменение конфигурации берегов.

### ОБЛАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лена – одна из крупнейших рек России и мира. Ее длина 4260 км, площадь бассейна 2.49 млн км<sup>2</sup>. При впадении в море Лаптевых Лена образует крупнейшую в Арктике (и одну из самых больших в мире) дельту площадью ~29.3 тыс. км<sup>2</sup>, расположенную между 72° и 73° с.ш. и 122° и 129° в.д. Вершина дельты (ВД) находится на выходе из “Ленской трубы” в месте отделения от Лены влево Булкурской протоки (впадающей в Оленекскую протоку) в ~175 км от моря. Второй большой узел разветвления главного рукава Лены (в различных источниках принимается за ВД) находится в районе о. Столб – останца Хараулахского хребта (~150 км от моря) (рис. 1). Здесь русло Лены делится на основные магистральные рукава (с 3 на В): протоки Оленекскую (длиной 202 км), Туматскую (145 км), Трофимовскую (150 км) и Быковскую (102 км). Длина изрезанного морского края дельты (МКД) составляет ~1930 км.

Гидрографическая сеть дельты Лены очень сложная (рис. 1). Она включает в себя ~6100 водотоков общей длиной 14.6 тыс. км, от ~29.5 до 59 тыс. озер (в основном термокарстовые) общей

площадью ~3200 км<sup>2</sup>, а также >1600 островов [5, 17]. Окружающие дельту возвышенности – это типичная тундра, лишенная древесной растительности.

На территории дельты Лены развиты водный транспорт и рыболовство. Наибольшее судоходное значение имеет Быковская протока, по которой суда доходят до порта Тикси, расположенного на берегу одноименной бухты.

Маккензи – наиболее протяженная река Канады, ее длина 1770 км, площадь бассейна 1.8 млн км<sup>2</sup> [45]. Дельта Маккензи, расположенная между 67° и 70° с.ш. и 134° и 136° з.д., – самая большая в Канаде (площадь 13000 км<sup>2</sup> [49]), вторая по величине арктическая дельта после дельты Лены и вторая после дельты Миссисипи в Северной Америке. ВД Маккензи находится в месте деления реки на рукава (Пойнт-Сепарейшн) в ~210 км от моря Бофорта (рис. 2). Наиболее крупные магистральные рукава дельты – Восточный (длиной ~215 км), Средний (~245 км) и Западный (в верхней части – Пил, ~170 км), соединенные между собой множеством мелких протоков.

Дельту Маккензи называют страной озер. На ее территории насчитывается >45 тыс. водоемов (коэффициент озерности от 30 до 50%) – преимущественно небольших (средняя площадь поверхности 0.12 км<sup>2</sup>) и неглубоких (средняя глубина <4 м), создающих уникальную водную экосистему для рыб, водоплавающих птиц и млекопитающих. Мелководные озера в дельте можно разделить на три группы: постоянно соединяющиеся с рукавом (60%), затапливаемые только в весеннее половодье и изолированные от протока в остальную

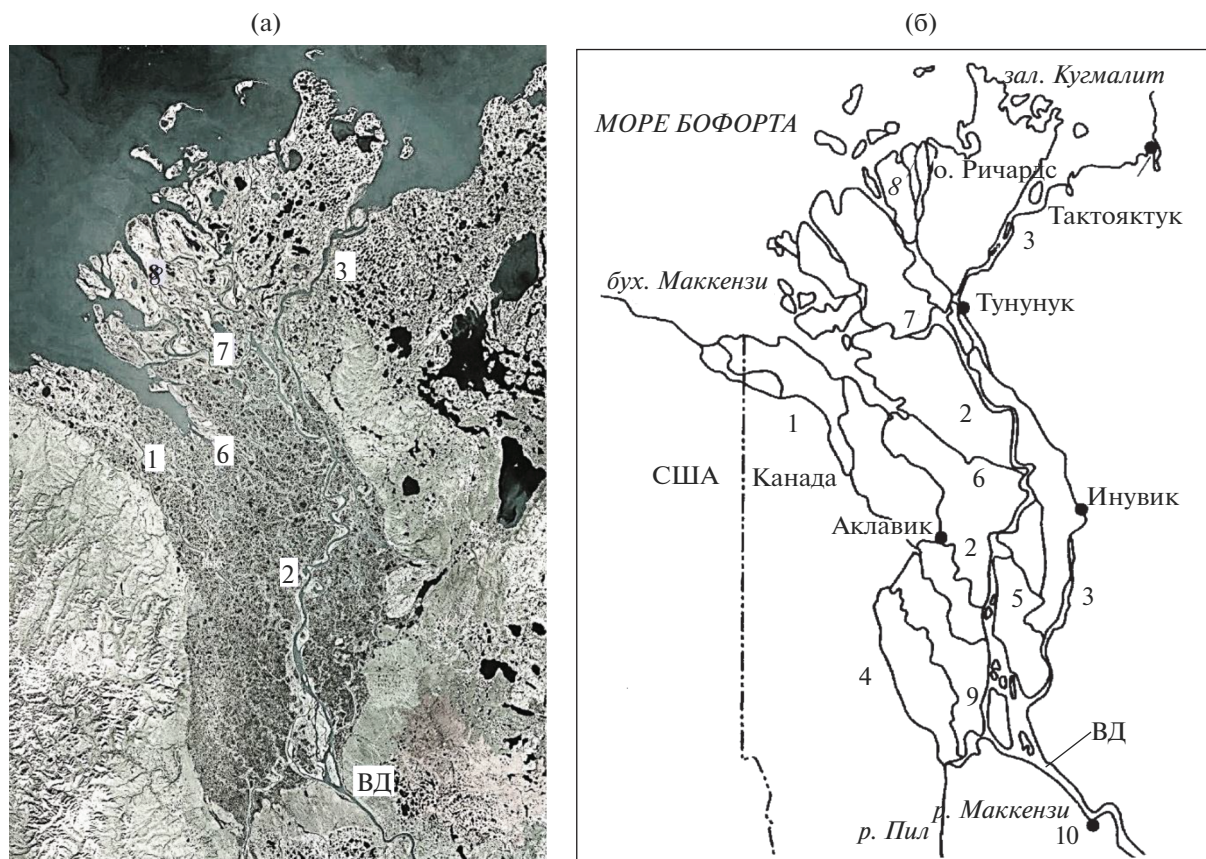


Рис. 2. Карта (а) и схема (б) дельты Маккензи по [18, 56]. Рукава и протоки: 1 – Западный, 2 – Средний, 3 – Восточный, 4 – Пил, 5 – Калинек, 6 – Напояк, 7 – Рейндер, 8 – Кумак, 9 – Левый; 10 – г/п Арктик-Ред-Ривер.

часть года (25%), затопляемые в период исключительно высокого половодья (15%) [49].

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДАННЫЕ

В исследовании применены следующие методы: сравнительный физико-географический анализ, оценка и сравнение величин стока воды  $W_Q$  и наносов рек  $W_R$ , анализ реакции ММП на потепление климата и ее влияния на сток воды и наносов рек.

Рассмотрено географическое положение водосборов рек Лены и Маккензи, выделены основные различия их геологического строения, природных зон, а также степень освоения земель на территориях бассейнов рек. Проанализирована информация о границах распространения в исследуемых дельтах разных типов ММП, представленная в [8, 14, 20, 21, 28, 39, 35, 41, 42, 47].

Сток воды и наносов и его распределение по рукавам – одни из основных факторов, влияющих на особенности гидролого-морфологических процессов в дельтах рек. Сток воды в ВД отражает состояние реки на верхней границе устьевой области и имеет, как правило, наиболее

длинные ряды наблюдений. Поэтому в данной работе  $W_Q$  используется как основная количественная характеристика при сравнении дельт Лены и Маккензи. Вторая количественная характеристика дельты – сток наносов  $W_R$  в ее вершине – зависит от многих факторов, основные из которых – геологическое строение бассейна реки, климат и количество осадков, расход воды и регулирование стока реки, степень освоения земель бассейна реки человеком. Таким образом, эта характеристика интегрирует все процессы в реке выше дельты. Данные о долговременных изменениях  $W_Q$ , а также о регулировании стока рек Лены и Маккензи приведены по [1, 25, 26, 36, 38, 41, 45]. Сток наносов  $W_R$  в исследуемых устьях рек, позволяющий в том числе оценить вынос твердого материала и загрязняющих веществ в арктические моря, оценивался по данным, представленным в [23, 26, 36, 38, 41].

Потепление климата и хозяйственная деятельность человека приводят к изменению свойств ММП и сокращению площади их распространения [2, 22, 32, 37, 46, 47]. Увеличение среднегодовой температуры воздуха  $T$  приводит к повышению температуры поверхности земли  $T_g$ , которое

**Таблица 1.** Гидролого-климатические характеристики устьев рек Лены и Маккензи

Характеристика	Устье Лены	Устье Маккензи
Средняя температура воздуха, °С		
январь	–36...–32	–30...–24
июль	+4...+8	+8...+13
Осадки, мм	250–300	250–300
Испарение, мм	~200	286
Испаряемость, мм	150	200
Сток воды в ВД, км <sup>3</sup> /год (мм)	536 (214)	292 (194)
Средний годовой расход воды в ВД, м <sup>3</sup> /с	17000	11000
Средний максимальный расход воды в ВД, м <sup>3</sup> /с	135000	25000
Питание	Смешанное с преобладанием снегового	
Время замерзания	сентябрь–октябрь	
Время вскрытия	Май	Май
Период ледостава (ледовых явлений), сут	236 (250)	~200 (~240)
Толщина льда, см	230	>70
Объем наносов в ВД, млн т/год	22.5	130
Средняя мутность, г/м <sup>3</sup>	43	~370

вызывает изменение температуры грунта на разных глубинах  $T'_g$  и увеличение толщины сезонного слоя  $d$  (СТС). В результате меняется тип распространения ММП: от сплошного к островному.

#### ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСТЬЕВ ЛЕНЫ И МАККЕНЗИ И ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В НИХ ММП

Устья рек Лены и Маккензи приурочены к областям древней палеозойской (Маккензи) и средней мезозойской (Лена) складчатости. Это равнинные территории (уклон долины дельты  $\sim 1.1 \times 10^{-4}$ ), ограниченные с З и В горными цепями. В устье Лены это кряж Чекановский и северные отроги Верхоянского хребта, в устье Маккензи – хребет Ричардсон (северные отроги Кордильер) и холмы Карибу (Канадский щит). В геоморфологическом плане дельта Лены состоит из собственно дельтовых образований, дочетвертичных останцов коренных пород (острова Столб, Америка-Хайя, Сардах), остатков озерно-аллювиальных массивов Приморской низменности (“едомы”) и участков морской террасы, объединенных между собой в ходе образования дельты. Дельта Маккензи приурочена к практически плоской равнине с высотой над уровнем моря всего 10 м (километрическое падение 0.13 м/км, уклон долины дельты  $6.0 \times 10^{-5}$  [29]). В современном рельефе дельты Маккензи хорошо выражены формы, связанные с ее положением в зоне ММП.

Здесь развиты термокарстовые озера, “тундровые полигоны” и гидролакколиты.

Устья рек Лены и Маккензи находятся в арктическом климатическом поясе (при этом дельта Маккензи расположена южнее дельты Лены на 400 км), который характеризуется коротким прохладным летом и продолжительной малоснежной и морозной зимой (табл. 1). Климат в районе устья Лены по сравнению с устьем Маккензи более резко континентальный, средняя годовая температура воздуха в дельтах Лены и Маккензи отрицательная – ( $-15^\circ$  и  $-11^\circ\text{C}$  соответственно). Годовое количество атмосферных осадков в обоих устьях почти равное (табл. 1). Зимние осадки невелики, мала и толщина снежного покрова, что способствует значительному промерзанию почвы зимой. Дельты обеих рек приурочены к зоне тундры и лесотундры.

#### *Ледовые явления в устьях Лены и Маккензи*

Ледовый режим водотоков дельт Лены и Маккензи определяется направлением течения рек с Ю на С. Замерзание воды в реках начинается с устьев в конце сентября – начале октября. Вскрытие рек начинается с верховьев, сопровождается регулярными заторами льда (особенно на разветвленных участках русла) и достигает дельт между серединой мая и серединой июня.

Длительность ледостава в дельте Лены увеличивается от 223 дней в году в ВД до 273 дней вблизи МКД [17]. Осенью толщина льда в дельте, начиная с Быковской протоки, нарастает посте-



пенно, в среднем со второй недели октября до максимальной величины (2.2–2.3 м) в апреле–мае. Весеннее вскрытие часто сопровождается заторами льда выше ВД, которые могут распространяться на большие расстояния – от нескольких сотен метров до сотен и более километров, достигая рукавов дельты (например, вплоть до Сардакско-Трофимовского узла разветвления), приводящими к повышению уровня воды на 5–10 м. Продолжительность существования заторов – от нескольких часов до нескольких суток. Так, например, в июне 1963 г. в ВД Лены мощный затор льда протяженностью 130 км просуществовал 10 сут [15]. Во время образования и прорыва заторов растет эрозионная и транспортирующая способность водотоков, приводящая к значительным русловым деформациям в водотоках дельты [10, 26]. В рукавах дельты (Оленекская, Трофимовская, Быковская протоки) заторы не продолжительные и, как правило, не приводят к значительным подъемам уровня воды, так как вода и лед перераспределяются в смежные рукава. Лыдины, достигающие рукавов дельты, часто не тают и остаются в них все лето до следующей осени.

В дельте Маккензи ледостав устанавливается во второй половине ноября. В рукавах и озерах дельты толщина льда зависит от местоположения и меняется от года к году, достигая 2 м в нижней (северной) части дельты [38]. На устьевом взморье Маккензи максимальная толщина льда 1.8 м, исключая районы торосов. Вблизи дельты образуется ледяной припай шириной 10–20 км. Вскрытие рукавов дельты Маккензи начинается одновременно с паводком на реках Пил и Маккензи (механическое вскрытие). Значительные ледяные заторы выше ВД повышают заторный уровень воды, вызывая крутые волны и подвижку огромных льдин при прорыве затора. Эти льдины обычно скапливаются в рук. Среднем, где ледяные заторы доходят до места впадения в него рук. Калинек. Ледяные заторы также формируются на верхних участках рук. Восточного, ниже его отделения от Среднего. В этой части дельты льдины, образующие затор, не выталкиваются в рукава севернее линии Инувик–Аклавик [26]. В конце мая–начале июня ледяные заторы приводят к затоплению большей части дельты [29]. Во второй половине XX в. ледовые условия в рукавах дельты Маккензи менялись незначительно: толщина льда уменьшалась (~1 см), вскрытие рукавов стало происходить раньше (менее суток) [26].

#### *Особенности распространения ММП в исследуемых устьях рек*

Гидрологический режим рек криолитозоны характеризуется слабым грунтовым питанием, маловодьем рек зоны ММП в зимний период вплоть до полного промерзания, образованием

наледей и слабым развитием эрозионных процессов, так как скованные мерзлотой грунты трудно поддаются размыву [14].

Большая часть (80%) бассейна Лены расположена в зоне сплошных и прерывистых ММП. Дельта Лены полностью находится в зоне сплошных ММП, мощность которых достигает 600–650 м. В районе устья Лены распространены кембрийские и юрские песчано-глинистые, известняковые и песчано-глинистые и песчаниковые отложения платформенного типа. Третичные песчано-глинистые отложения миоцена или плиоцена встречаются эпизодически. Мерзлые породы распространены повсеместно (кроме подрусловых полос и днищ глубоких озер). В устьевой области Лены в суглинках пойменной фации в составе всех террас присутствуют слои полигонально-жильного льда (толщиной до  $\geq 20$  м), за исключением первой надпойменной террасы и современной поймы [25].

Почти 13% бассейна Маккензи расположено в зоне сплошных ММП, 29% – в зоне прерывистых. Вся дельта находится в зоне прерывистых ММП (50–90%), исключая нижнее течение рук. Восточного, где распространены сплошные ММП (90–100%) [28]. Более детальные исследования, представленные в [29], показывают, что подстилающая поверхность дельты Маккензи, не считая площади под протоками и озерами, на 90% сложена сплошными мерзлыми грунтами, толщина которых меняется в диапазоне 100–700 м.

Интенсивный рост среднегодовой глобальной температуры воздуха ( $1.17^\circ\text{C}$  за период с 1880–1920 гг. по 2017 г. [37]) оказывает существенное влияние на положение границы распространения ММП. Современная деградация ММП в России отражается на сдвиге западной границы сплошной криолитозоны от эстуариев рек Мезень и Кулой (бассейн Белого моря), где она наблюдалась в XIX в., к устью Печоры [21]. Однако сравнение современных границ распространения ММП, приведенных в [20], с данными, представленными в [21], не показывает существенного сдвига границы распространения ММП к С в бассейне Лены. В бассейне Маккензи за 1896–2011 гг. (период устойчивого роста  $T$  [33]) южная граница распространения ММП сместилась от г. Форт-Норман ( $\sim 64.5^\circ$  с.ш.) до г. Инувик ( $\sim 68.2^\circ$  с.ш.). В то же время даже кратковременные изменения  $T$  приводят к локальной миграции границы ММП. Например, понижение  $T$  в 1940-х гг. на  $2^\circ\text{C}$  сопровождалось движением границы распространения ММП в долине Маккензи к Ю до  $67.3^\circ$  с.ш. Быстрый рост  $T$  на арктическом побережье, отмеченный в [29], подтверждается в [45] данными об увеличении  $T$  в дельте Маккензи на побережье моря Бофорта (о. Ричардс) на  $2.5^\circ\text{C}$  с 1970 г.

Анализ результатов последних исследований повышения  $T$  на побережье Северного Ледовитого океана, представленных в [11], показал наибольший ее рост ( $2-3^{\circ}\text{C}$ ) за период с 1951–1989 гг. по 2017 г. в приполярных областях России и Северной Америки, а также в центральной части Сибири. Исследование осредненных аномалий среднегодовой температуры воздуха на территории России за 1936–2009 гг. показало наличие положительного линейного тренда  $T \sim 0.6^{\circ}\text{C}$  в широтной зоне  $60^{\circ}-85^{\circ}$  с.ш. и  $T \sim 0.8^{\circ}\text{C}$  – в зоне  $60^{\circ}-70^{\circ}$  с.ш. [2]. Эти данные наблюдений подтверждают результаты моделирования изменения средней для бассейна Лены нормы температуры воздуха за 2006–2035 гг., составляющие при различных сценариях изменений климата  $1.5-2.0^{\circ}\text{C}$  [6].

Согласно [29], рост  $T_g$  в устьевой области Маккензи в период 1970–2008 гг. составил  $1.5-2.5^{\circ}\text{C}$ , глубина СТС увеличилась на 8 см за 1983–2008 гг. 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 [42]. За 1980–2002 гг. рост глубины активного слоя составил 0.47 см/год [49]. Увеличение толщины активного слоя и разрушение мерзлых грунтов вплоть до исчезновения ММП способствуют дренированию поверхностного слоя грунта, а таяние верхнего слоя ММП – сильному увлажнению и нестабильности мерзлых грунтов и повышенной эрозии.

### ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВОДНЫЙ РЕЖИМ УСТЬЕВ ЛЕНЫ И МАККЕНЗИ

Дельты рек можно разделить на условные части, для которых характерно преимущественное влияние речных или морских факторов. Так, дельта Лены делится на три зоны: верхнюю (с преобладанием речных факторов), среднюю (промежуточную), расположенную в зоне переменного подпора от колебаний уровня моря и в которую распространяются нагоны, и нижнюю – приморскую (с существенным влиянием морских факторов в период низкого стока реки) [17, 25]. Дельту Маккензи подразделяют на две части – верхнюю (речную) и нижнюю (с преобладанием влияния морских факторов) [49].

#### *Сток воды, наносов и тепла в вершинах дельт*

Водный режим дельт Лены и Маккензи характеризуется наличием растянутого летнего половодья (как правило, с июня по сентябрь, реже с мая по сентябрь) и дождевых паводков, а также продолжительной зимней меженью (в дельте Лены 230–240 сут). Питание рек смешанное (снего-

вое и дождевое), доля подземного питания незначительная.

Средний многолетний расход воды  $Q_{cp}$  Лены на гидропосту (г/п) Кюсюр ( $\sim 200$  км выше ВД) равен  $16980 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $\sim 17000 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $536 \text{ км}^3/\text{год}$ ) за 1936–2011 гг. (табл. 2). По данным, представленным в [16],  $Q_{cp}$  Лены на этом же г/п за 1927–2014 гг. составил  $17200 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $542 \text{ км}^3/\text{год}$ ). Сток воды реки меняется от  $401 \text{ км}^3$  (в наиболее маловодном 1986 г.) до  $728 \text{ км}^3$  (в наиболее многоводном 1989 г.). Максимальные расходы воды в половодье в устье реки  $> 100000 \text{ м}^3/\text{с}$ , наибольший расход ( $220000 \text{ м}^3/\text{с}$ ) отмечен в 1989 г. Как показано на рис. 3а,  $W_Q$  Лены увеличивался за 1936–2011 гг. со средней интенсивностью  $37.7 \text{ м}^3/\text{с}$  в год ( $0.19\%$  среднемноголетнего значения). По данным [25], за 1951–2001 гг. средний расход воды реки в период половодья увеличивался на  $117 \text{ м}^3/\text{с}$  в год, в период зимней межени – на  $22 \text{ м}^3/\text{с}$  в год, в период летней межени практически не менялся. Наибольший вклад в повышение  $W_Q$  Лены в ВД вносят южная часть бассейна реки, а также притоки Алдан и Вилюй [7].

Сток воды реки в течение года распределен крайне неравномерно (табл. 3). Более  $74\%$   $W_Q$  в дельте Лены приходится на период половодья, а основной сток ( $\sim 90\%$ ) – на период с мая по октябрь. Самые многоводные месяцы – июнь ( $30.4-37.5\%$ ) и июль ( $16.0-21.4\%$ ). Гидрограф половодья в ВД Лены имеет одну хорошо выраженную волну с довольно значительными величинами расходов воды, что связано с климатическими факторами и наличием ММП. Снежный покров в начале зимы ложится, как правило, на мерзлую почву. Поэтому в период снеготаяния талые воды быстро поступают в речную сеть, формируя высокое половодье.

Средний многолетний сток взвешенных наносов  $W_R$  выше ВД Лены (г/п Кюсюр) составляет 22.5 млн т/год, влекомых наносов – от 1.06 до  $\sim 5.4$  млн т/год [16]. Основной сток наносов происходит в период прохождения половодья или паводков (до  $84\%$ ). Средняя мутность реки выше ВД сравнительно невелика –  $43 \text{ г}/\text{м}^3$ ; максимальная и минимальная мутность – 400 и  $25 \text{ г}/\text{м}^3$  соответственно. В районе о. Столб среднемноголетний расход взвешенных наносов  $\sim 650 \text{ кг}/\text{с}$ ,  $W_R = 20.4$  млн т/год, среднегодовая мутность  $40 \text{ г}/\text{м}^3$ . Низкая мутность воды в ВД связана со слабым поступлением продуктов бассейновой эрозии в русло реки, вызванным продолжительным периодом с отрицательной  $T$ , распространением сплошных ММП, равнинным рельефом и залесенностью бассейна [16].

$Q_{cp}$  Маккензи на г/п Арктик-Ред-Ривер (н.п. Тсиигетчик, в  $\sim 25$  км выше ВД) за 1972–2000 гг., по [54], составляет  $9000 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $W_Q =$

**Таблица 2.** Сведения о многолетнем стоке воды р. Лены и водотоков ее дельты по [1] (прот. – протока)

Водоток	Гидроствор	Период, годы	Средний многолетний расход воды $Q_{\text{ср}}$ , м <sup>3</sup> /с	Наибольший расход воды $Q_{\text{наиб}}$ , м <sup>3</sup> /с	Наименьший расход воды $Q_{\text{наим}}$ , м <sup>3</sup> /с		Сток воды $W_Q$ , км <sup>3</sup> /год
					период открытого русла	зимний период	
р. Лена	Кюсюр	1936–2011	16980	220000	9800	366	536
р. Лена, главное русло	4.7 км выше о. Столб	1950–2005	15400	189000	9850	380	486
прот. Быковская	Хабарова	1950–2005	4150	52500	2260	75.6	131
прот. Трофимовская	Трофимовский	1950–2005	10200	76300	7130	670	322
прот. Оленекская	Оленекский	1977–2005	1140	34300	449	н/б	36.0
прот. Туматская	Туматский	1977–2005	1090	28800	265	н/б	34.4

**Таблица 3.** Внутригодовое распределение расходов воды  $Q$  в вершинах дельт Лены (г/п Кюсюр) и Маккензи (г/п Арктик-Ред-Ривер) (I–XII – месяцы)

Река	Период, годы	$Q$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Лена	1934–1975 [17]	м <sup>3</sup> /с	2540	1870	1360	1100	5350	74200	39100	27200	24700	14200	3370	2730	16500
		%	1.30	0.91	0.68	0.56	2.70	37.5	19.8	13.7	12.5	7.24	1.72	1.39	100
	1976–1994 [54]	м <sup>3</sup> /с	3140	2670	2120	1760	5890	61830	39490	26170	21890	13210	3340	3070	15380
		%	1.70	1.45	1.15	0.95	3.19	33.5	21.4	14.2	11.9	7.16	1.81	1.66	100
	2005–2011 [1]	м <sup>3</sup> /с	4820	3680	2730	2210	18460	69300	36380	29980	31960	18480	5070	4620	18970
		%	2.12	1.62	1.20	0.97	8.11	30.4	16.0	13.2	14.0	8.12	2.23	2.03	100
Маккензи	1972–2000 [54]	м <sup>3</sup> /с	3890	3610	3360	3490	13630	20460	17140	13770	11310	9020	4720	3640	9000
		%	3.60	3.34	3.11	3.23	12.6	18.9	15.9	12.7	10.5	8.35	4.37	3.37	100

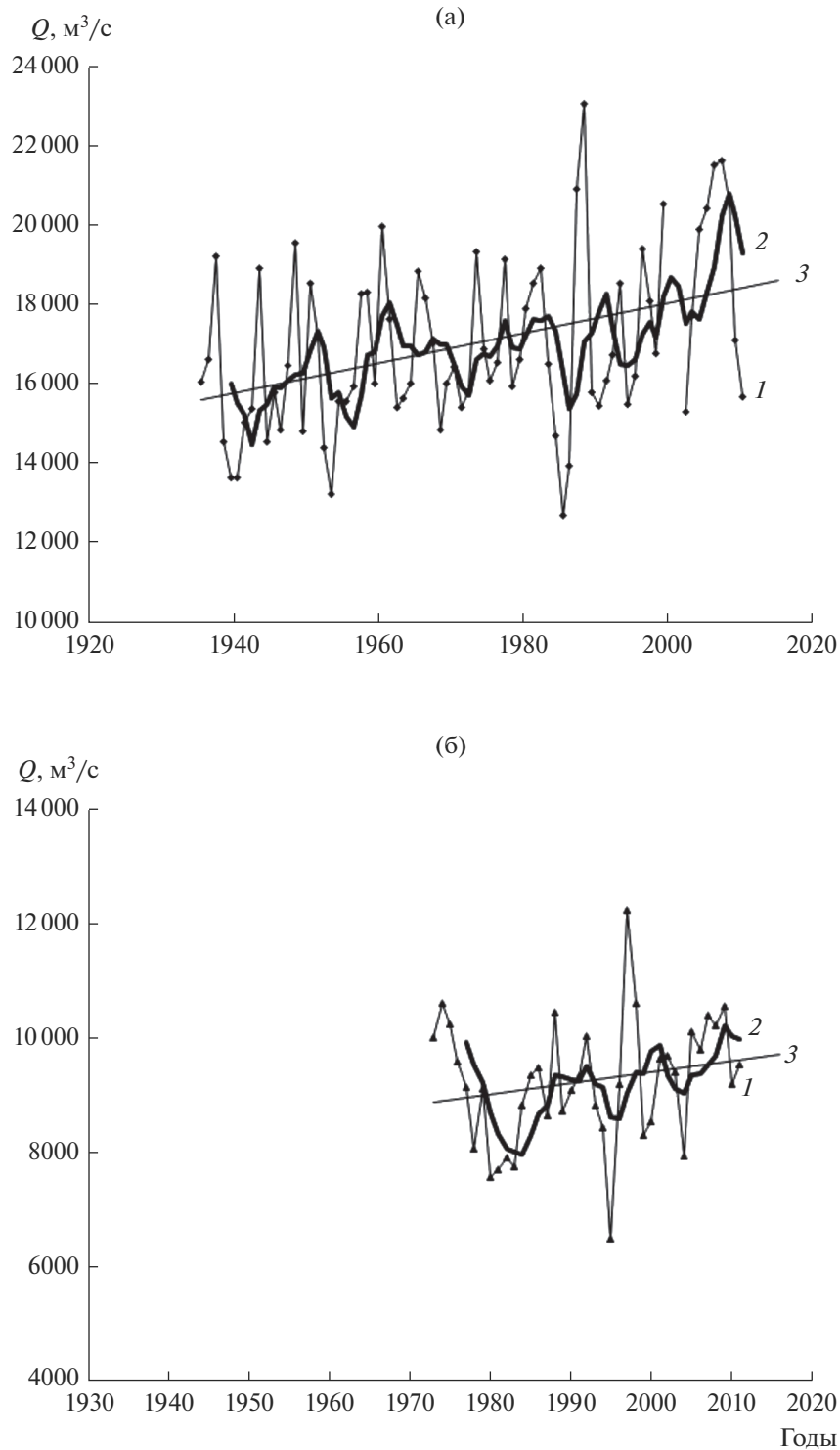
= 284 км<sup>3</sup>/год). Расчет, проведенный авторами настоящей статьи по данным [33], в ВД Маккензи дает величину  $Q_{\text{ср}} = 9260$  м<sup>3</sup>/с (292 км<sup>3</sup>/год) за 1973–2011 гг. За этот период отмечается слабый рост  $Q_{\text{ср}}$  с интенсивностью 19.4 м<sup>3</sup>/с в год (0.21%) (рис. 3б). Однако в начале XXI в. возрастание  $Q_{\text{ср}}$  усилилось до 0.91% в год (или на 9.1% за 2000–2011 гг.). Детальные исследования изменений стока воды рек бассейна Маккензи, представленные в [45], также показали увеличение стока воды Маккензи и ее левого притока Лиарда за 1965–2014 гг.

Основной сток воды (до 71% годового) Маккензи в ВД приходится на период летнего половодья, самые многоводные месяцы – июнь (18.9%) и июль (15.9%) (табл. 3). Среднемесячные расходы воды реки меняются от 3500 м<sup>3</sup>/с в зимнюю межень до 25000 м<sup>3</sup>/с в половодье.

$W_R$  в ВД Маккензи составляет ~128 млн т/год (средняя мутность воды 370 г/м<sup>3</sup>) [30], это мак-

симальная величина  $W_R$  для рек водосбора Северного Ледовитого океана [11]. Треть наносов (до 46 млн т/год) поступает в Маккензи со стоком р. Лиард, несущего свои воды с отрогов Канадских Скалистых гор (горы Пелли). Левые притоки, впадающие в Маккензи ниже устья Лиарда (в том числе р. Пил), приносят дополнительно до 50 млн т/год наносов,  $W_R$  правых притоков незначителен, ~5 млн т/год [30]. С учетом данных [30] рассчитано поступление наносов в ВД Маккензи в результате береговой эрозии основного русла реки (~18 млн т/год).

Температура воды в вершинах дельт в период с мая по сентябрь меняется от 5.1 до 14.2°C (Лена) и 5.0–16.0°C (Маккензи). Величина среднего теплового стока Лены в ВД за 1935–2012 гг. составляет  $15.6 \times 10^{15}$  кДж/год [16], при этом отмечается увеличение стока тепла с  $15.3 \times 10^{15}$  в 1935–1980 гг. до  $16.0 \times 10^{15}$  кДж/год в 1980–2012 гг. По оценкам [52], средний тепловой сток в ВД Мак-



**Рис. 3.** Многолетние изменения расхода воды Лены (г/п Кюсюр) (а) и Маккензи (г/п Ред-Арктик-Ривер) (б). 1 – среднегодовые расходы воды, 2 – осредненные за 5 лет, 3 – многолетний тренд.

кензи за 1973–2011 гг. составляет  $\sim 10.5 \times 10^{15}$  кДж/год. Увеличение теплового стока р. Маккензи в океан подтверждается наблюдениями за изменением распространения морского льда в тече-

ние июня–сентября в периоды 2003, 2004, 2006 и 2008 гг., представленными в [36]. Рост теплового стока реки меняет условия взаимодействия морских и речных вод на устьевом взморье, способ-



ствует оттаиванию береговых ММП, увеличению стока наносов в море и размыву края дельты.

### *Морские факторы*

Устьевое взморье Лены — относительно мелководный участок моря Лаптевых (средняя глубина на шельфе 20–40 м [5]) — характеризуется интенсивной динамикой вод, сложной вертикальной структурой, значительной стратификацией, наличием струйных потоков, поступающих из проток дельты. В вертикальной термохалинной структуре они проявляются как относительно теплые распресненные линзы. В зоне влияния речного стока стратификация вод остается значительной, несмотря на малые глубины.

В настоящее время эвстатическое повышение уровня моря Лаптевых в районе дельты Лены меняется от 0.046 до 0.206 см/год в западной части взморья (Оленекский зал. и о. Дунай) и до 0.162 см/год в восточной части (бух. Тикси). Средняя температура воды поверхностного слоя моря Лаптевых на взморье Лены меняется в пределах 3.3–6.1°C, придонного — –1.1...+6.0°C [24]. Соленость воды в поверхностном слое по мере удаления от МКД меняется от 5.2 (минимальная 2.0) до 12.8‰, в придонном слое — от 8.40 до 31.6‰, при этом мористее дельты эффект опреснения снижается в направлении с ЮВ на СЗ и С. Приливы в море полусуточные, их средняя величина ~0.5 м. При нагонах, величина которых нередко превышает величину прилива, резко увеличивается соленость (до 28‰) в придонном горизонте и снижается температура воды. При сгоне возникает компенсационное противотечение, типичное для моря Лаптевых, которое приносит в придонные слои бух. Буор-Хая соленые воды из районов открытого шельфа.

Море Лаптевых большую часть года (с октября по май) покрыто льдами разной толщины и возраста, здесь также наблюдаются большие скопления пакового льда. В восточной части взморья зимой отмечается мощный припай, за границей которого находятся дрейфующие льды.

Высокоширотное положение, характер крупномасштабной циркуляции атмосферы, низкое побережье, открытое на С и закрытое хребтом Брукса с Ю, определяют основные черты климата моря Бофорта. Температура воды в поверхностном слое распределяется довольно равномерно, что объясняется в основном широтным простиранием моря и его широкой и свободной связью с Северным Ледовитым океаном. Зимой температура воды на поверхности почти везде –1.5°C [39]. Летом воды моря Бофорта прогреваются сравнительно мало: температура воды на поверхности в северной и северо-западной частях достигает –0.5...–1°C, увеличиваясь к Ю до 0...+2°C.

Течения в море Бофорта образуют циклональный круговорот, на южной периферии которого в августе в восточном направлении переносятся воды, прогретые до +4°C, с соленостью ~28‰, а на северной периферии — в западном направлении переносятся арктические воды с температурой –1.5°C и соленостью ~32‰ [39]. Море Бофорта практически весь год покрыто льдами, кромка которых в августе расположена в 50–100 км от побережья. Средняя величина прилива в море Бофорта 0.3 м, максимальная 0.5 м в п. Тактояктук. Волнение оказывает влияние в основном летом в период открытой воды. Высота и период волн в среднем меньше 4 м и 8 с. Штормовые нагоны, как правило, вызваны северо-западными ветрами и формируют довольно сильные течения на мелководном устьевом взморье Маккензи. Максимальное повышение уровня моря во время нагона в зал. Кугмаллит составляет 2.4 м.

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТОКА ВОДЫ И УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ В РУКАВАХ ДЕЛТ ЛЕНЫ И МАККЕНЗИ

**Дельта Лены.** В ВД Лены (первом узле разветвления) основной сток воды реки (~92%) сосредоточен в главном русле (Лена). Булкурская протока, на долю которой приходится ~8% водного стока в ВД, действует только в половодье и несет свои воды в Оленекскую протоку. На спаде половодья в месте слияния этих проток сток воды из Булкурской протоки в Оленекскую прекращается, а в межень часть стока Оленекской протоки может поступать в Булкурскую [5]. В [5] также отмечается, что при образовании ледяных заторов в период половодья на верхнем участке Оленекской протоки сток воды из Булкурской протоки направляется в Туматскую. Во втором (главном) узле разветвления Лена делится на основные рукава (протоки). По данным [3], в системе Трофимовской протоки сосредоточено до 42% водотоков дельты, Туматской ~29, Оленекской 18 и Быковской 11%. При этом на долю восточных рукавов (Большая Трофимовская и Быковская протоки) приходится >86% стока воды Лены в ВД.

Больше половины (~61.5%) водного стока Лены в главном узле разветвления (г/п “4.7 км от о. Столб”) поступает в систему Трофимовской протоки, распределяясь далее в Сардахскую (60%) и Большую Трофимовскую (40%), в устье которой доходит только 8% стока в месте отделения протоки (остальное распределяется в боковые водотоки). С ростом расхода воды в главном русле Лены часть расхода воды, поступающего в Трофимовскую протоку, перераспределяется между Быковской, Оленекской и Туматской протоками (рис. 4а). В систему Быковской протоки поступает до ~25.5% стока Лены, при этом, согласно [5],

ниже по течению система подпитывается водами Сардахской протоки (по мелким извилистым рукавам). Доля стока Оленекской (западной) протоки в среднем составляет ~6.8% стока воды Лены и в зависимости от фазы водного режима меняется от 2–4 (межень) до 10% (половодье). На систему Туматской протоки приходится 6.4% стока Лены в главном узле разветвления. Во второй половине XX в. отмечалось увеличение расходов воды в протоках Быковской (на 8.2 м<sup>3</sup>/с в год, 0.20% среднемноголетнего расхода воды рукава), Трофимовской (на 46 м<sup>3</sup>/с в год, 0.45%), Туматской (на 6.0 м<sup>3</sup>/с в год, 0.55%) и Оленекской (на 6.3 м<sup>3</sup>/с в год, 0.55%) [25]. При этом наблюдалось некоторое снижение стока воды в Оленекской протоке в летне-осенний период, что наряду с увеличением мутности воды и стока наносов способствует заносимости русла протоки.

Уровненный режим водотоков дельты Лены определяется главным образом изменениями расхода воды реки (распластыванием волны половодья), приливами и нагонами (в приморской части дельты) и ледовыми заторами. Средний размах колебания уровня воды на участке реки от г/п Кюсюр до о. Столб (215 км) уменьшается вниз по течению почти в 2.5 раза и характеризуется значительным спадом весенних уровней с  $\geq 20$  до 7–9 м. На режим уровня воды в нижней части дельты Лены оказывают влияние приливы, волнение и штормовые нагоны в море Лаптевых. Сгонно-нагонные волны значительно превосходят волны приливов. Амплитуда сизигийных полусуточных приливов в устьях Быковской и Трофимовской проток составляет ~0.40 м, в устье Оленекской 0.65 м; высота нагонов может быть >1.5 м. При этом нагоны и приливы гасятся в дельте и не доходят до ее вершины. В устьях рукавов и проток на их водный и русловой режим усиливается влияние моря: происходит дополнительное осаждение взвешенного материала, меняется направление течений, уменьшается сток воды проток за счет его распределения по второстепенным протокам.

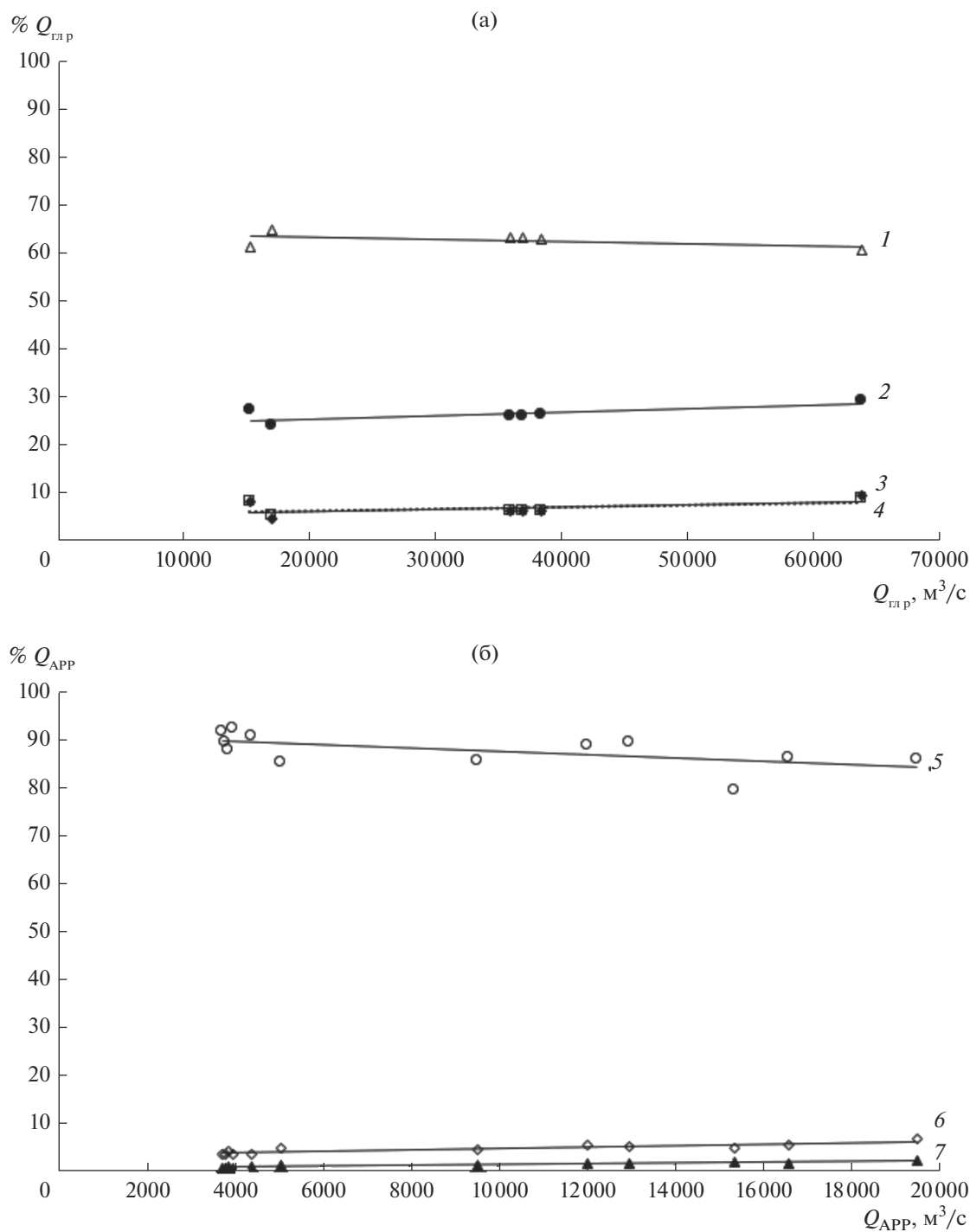
**Дельта Маккензи.** Современное распределение водного стока между основными рукавами дельты Маккензи также неравномерно, как и в дельте Лены. Большая часть (86%) стока воды в ВД Маккензи сосредоточена в рук. Среднем, распределяющегося далее в рукава Напоаяк, Рейндер и Кумак. На долю рук. Западного приходится 5%, Восточного – 1.5%. Данные величины рассчитаны по сведениям о среднемесячных расходах воды на границе южной и северной частей дельты (линия Инувик–Аклавик) в период 2009–2017 гг., представленным в [55]. Неувязка (92.5%) суммы долей стока рукавов связана, по-видимому, с неучтенным перераспределением стока воды в мелкие водотоки дельты, в том числе в рукава Калинек

(отделяющийся от Восточного рукава) и Аклавик (отделяющийся от Среднего), которые впадают в рукава Восточный и Западный ниже линии Инувик–Аклавик. Представленные в [18] приближенные оценки распределения стока воды в дельте, основанные на морфометрических данных, давали его более равномерное распределение во второй половине XX в. – по 36% стока реки в ВД приходилось на долю рукавов Среднего и Восточного и 28% на долю Западного. Данные оценки основывались на предположении, что весь сток в дельте распределяется по этим основным трем рукавам, а доля стока каждого рукава пропорциональна квадрату его ширины (ширина рукавов Западного, Среднего и Восточного – 530, 600 и 600 м соответственно) [18]. Столь существенное различие оценок распределения стока воды в дельте Маккензи, полученных авторами настоящей статьи и в [18], связано в первую очередь с достоверностью данных, на основе которых проводились расчеты (авторы настоящей статьи использовали опубликованные данные гидрометслужбы Канады).

Как и в дельте Лены, в дельте Маккензи наблюдается тенденция перераспределения расходов воды из рук. Среднего по второстепенным протокам в многоводный период (рис. 4б). Подобные процессы снижения доли стока магистральных рукавов дельт в многоводный период характерны и для крупных многорукавных дельт, расположенных вне криолитозоны, например Волги и Дуная.

Ледовые процессы в дельтах также могут оказывать влияние на распределение стока воды по дельтовым рукавам. Так, например, наличие ледяного затора на участке разветвления в районе ВД Маккензи может привести к незначительному перераспределению стока воды в пользу рук. Восточного (3%), при этом оставляя практически постоянным водный сток в зал. Кугмаллит (Киттигазуит) [27]. Также при заторе снижается поток воды из р. Пил в рук. Левый дельты (возможен даже обратный переток из рукава), что приводит к увеличению на ~4% стока воды рук. Западного (Пил) в море. На сток воды рук. Кумак в системе рук. Среднего наличие заторов практически не влияет в результате перераспределения стока в узле разветвления Средний–Рейндер–Неклек. В целом итоговое распределение и перераспределение стока воды между многочисленными рукавами дельты Маккензи происходит в пользу систем рукавов Западного и Среднего.

Максимальные уровни воды в рукавах дельты Маккензи наблюдаются в период половодья, минимальные – в зимнюю межень. Размах сезонных колебаний уровня воды в дельте быстро уменьшается от вершины дельты к взморью – с 6.6 до 0.2 м [18]. С удалением от вершины дельты уменьшает-



**Рис. 4.** Изменения долей расходов воды по основным рукавам дельты Лены (Главное русло (гл р), 2003–2005 гг.) (а) и Маккензи (Арктик-Ред-Ривер (АРР), 2009–2017 гг.) (б) по данным [1, 55]. Рукава (протоки): 1 – Трофимовская, 2 – Быковская, 3 – Оленекская, 4 – Туматская, 5 – Средний, 6 – Западный, 7 – Восточный.

ся высота прирусловых валов, поэтому нижняя часть дельты в половодье практически полностью заливается. На уровенный режим нижней части дельты Маккензи существенное влияние оказывают приливы, волнение и штормовые нагоны в море Бофорта.

#### СТОК НАНОСОВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДЕЛЬТАХ ЛЕНЫ И МАККЕНЗИ

**Дельта Лены.** Довольно значительный  $W_R$  в ВД Лены (22.5 млн т/год), ~85% которого остается в дельте и распределяется между дельтовыми рука-

вами приблизительно пропорционально распределению стока воды, обуславливает образование перекатных участков в протоках и формирование обширных устьевых баров в районах впадения протоков в море [13, 17]. Так, например, устьевой бар в устье Оленекской протоки достигает в длину 28, Большой Трофимовской – 13, Быковской – ~20 км. Мутность воды в рукавах и протоках при этом уменьшается (в среднем до 22–26 г/м<sup>3</sup>). При этом в приморской части дельты в ее рукавах в прилив расход наносов увеличивается в результате подпора со стороны моря и поступления осолоненных морских вод, вызывающих дополнительное осаждение взвешенного материала [5]. Руслу Оленекской, Трофимовской и Сардахской проток малоустойчивы и подвержены деформациям, проявляющимся в смещении побочной и осередков со скоростью 30–40 м/год и размыве берегов до 10 м/год.

Современная дельта Лены относительно молодая, при этом ее северо-западная часть (о. Арга и останцы) сложена более древними по сравнению с дельтой в целом аллювиальными осадками [5]. Дельта начала формироваться после последнего оледенения во время повышения уровня океана 5–6 тыс. лет назад, когда в устье Лены образовались два воронкообразных залива. Постепенно в заливах формировались дельты выполнения древних Оленекской и Быковской проток. Одновременно шло формирование дельт выдвигания в местах современных Туматской и Трофимовской проток. Современные черты гидрографической сети дельты Лены образовались 800–1000 лет назад. В целом за последние 5–7 тыс. лет выдвигание дельтового конуса выноса Лены в море составило 120–150 км [13, 17].

В настоящее время к наиболее активным и развивающимся рукавам дельты Лены относятся Быковская, Трофимовская, Сардахская протоки, а к теряющим активность или отмирающим – Оленекская, Булкурская, Туматская протоки. По краям дельты Лены происходит накопление материала, обусловленное лавинной седиментацией [25]. Дополнительное осадконакопление происходит также и в некоторых центральных частях дельты, а активная эрозионная деятельность – в среднем течении Туматской протоки, в районе разветвления проток Оленекской, Туматской и Булкурской, а также в районе о. Сардах (Сардахская протока). Ниже Сардахско-Трофимовского узла разветвления происходит уменьшение стока Большой Трофимовской протоки, увеличение стока воды и наносов в Сардахской протоке и усиление ее эрозионной способности и боковой эрозии [25]. Руслу Быковской протоки характеризуется сезонными деформациями перекатов.

Существенное влияние на русловые переформирования в водотоках дельты Лены, связанные с

сильной донной и береговой эрозией, а также с изменением конфигурации русла, оказывают ледяные заторы. Прорыв водным потоком ледяной преграды (затора), образующейся, как правило, перед сужениями русла или у островов [19], действует на русло как гидравлический удар, размывающий эффект которого несравненно больше нормального размыва течением. Одним из примеров проявления значительной донной эрозии могут служить значительные изменения глубин в водотоках дельты в районе Сардахско-Трофимовского узла разветвления за 1980–2000 гг. [25]. С 1981 по 2002 г. существенно уменьшилась ширина Сардахской протоки в результате роста косы у левого берега и значительно возросла глубина протоки (в настоящий момент средняя глубина протоки ~10 м). Ниже о. Сардах-Хайа образовалась яма глубиной до 30 м, в которой скорости течения в межень составляли >2 м/с. При прорыве особенно мощных заторов в ВД Лены волны и большие массы льда достигают о. Сардах-Хайа (4 км ниже о. Столб) и могут вызвать существенные деформации русла [25]. Таким образом, можно отметить, что в районе о. Сардах происходит интенсивное переформирование русла Сардахской протоки с явным размывом правого берега.

**Дельта Маккензи.** Основные рукава дельты – Западный, Средний (Напоаяк, Рейндер, Кумак) и Восточный – выносят на шельф Маккензи наносы, величина стока которых оценивается в 85 млн т/год (от 128 млн т/год в ВД) [30]. Остальные 43 млн т/год осаждаются в дельте (как результат основного осадконакопления ~102 млн т/год минус эрозия берегов дельты 59 млн т/год). Согласно [40], в дельте Маккензи оседает половина наносов, поступающих в ее вершину (~64 млн т/год), а большая часть выноса в море материала откладывается на шельфе, и только 13 млн т/год выносятся за его пределы. При расчете баланса наносов на устьевом взморье Маккензи установлено, что в дельте в настоящее время оседает ~56 млн т наносов в год [43]. По данным [36], в период максимальных расходов воды в половодье (июнь) “факел” мутных речных вод, который распространяется в море Бофорта и ограничивается нетающими морскими льдами, охватывает площадь в несколько тысяч квадратных километров (рис. 5). Ледяная плотина толщиной >20 м, образующаяся на устьевом взморье Маккензи вдоль изобаты 20 м и примерзающая ко дну, блокирует весенний водный сток из дельты, вызывая подпор в нижней части дельты и образуя “бассейн” мутных вод из вскрывшихся рукавов [36].

Перенос наносов на устьевом взморье Маккензи определяется строением узкого (площадью ~60 тыс. км<sup>2</sup>) и мелководного (глубина <60 м) шельфа со слабым уклоном (0.03°), водным стоком реки, направлением ветра и степенью покры-

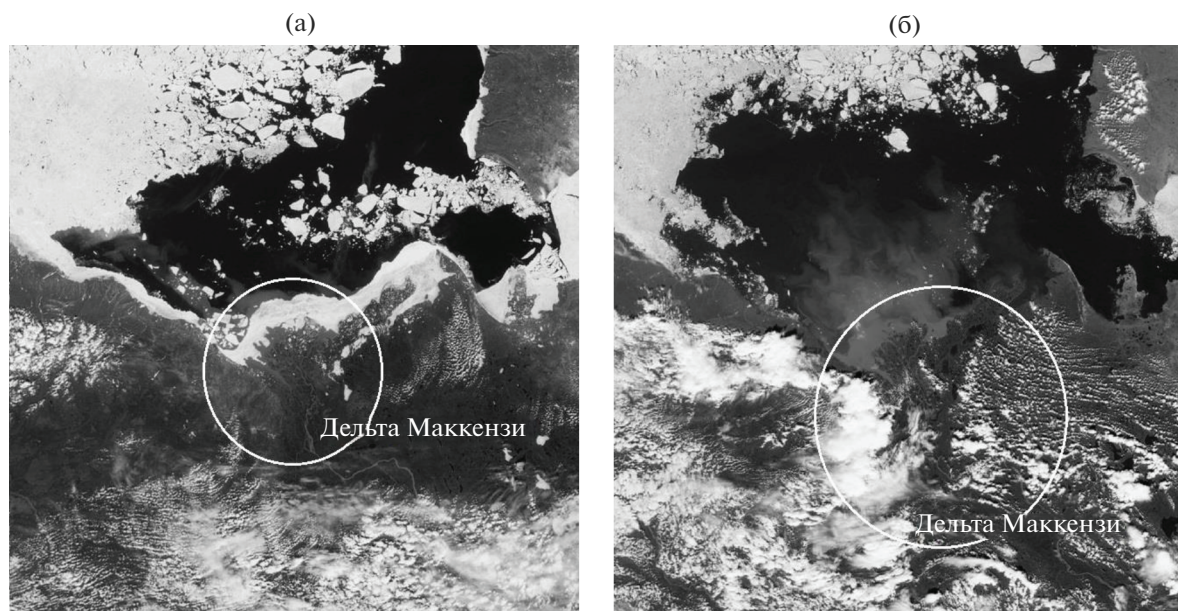


Рис. 5. “Факел” мутных вод и положение границы льдов на устьевом взморье Маккензи 14 июня (а) и 5 июля 2012 г. (б) по [53].

тия льдом [36, 43]. Исключение составляет западная часть бух. Маккензи, в которой глубина увеличивается до  $>100$  м (так называемый желоб Маккензи). В западную часть устьевое взморье реки (бух. Маккензи) поступает большая часть стока воды и наносов рукавов дельты по сравнению с восточной частью (зал. Кугмаллит) [36]. Наличие глубоководного желоба в бух. Маккензи способствует сосредоточению потоков наносов в западной части взморья. В восточной части взморья глубины значительно меньше. В [50] отмечено, что глубина зал. Кугмаллит сопоставима с толщиной припайного льда и сам залив в зимний период промерзает до дна. Таким образом, поток воды, поступающий в залив из Восточного рукава дельты (доля стока которого в устье составляет  $\sim 11\%$  стока Маккензи в ВД), перенаправляется в более глубокие водотоки или следует поверх льда. Мутность воды в устье Восточного рукава в период ледостава  $\sim 8.5$  г/м<sup>3</sup>, летом увеличивается до 48 г/м<sup>3</sup>, в том числе в результате взмучивания наносов во время нагонов.

В короткий промежуток времени с конца мая до начала июня в многочисленные озера в дельте поступает до половины всего стока наносов Маккензи в ВД [49]. Скорость осадконакопления в озерах растет от  $\sim 1$  до 10 мм/год от верхней к нижней части дельты и от закрытых озер к непрерывно связанным с рукавами дельты. Кроме того, оттаивание ММП вблизи озер приводит к многочисленным оползням и росту площади озер, который наблюдается по космическим снимкам [29]. Таким образом, озера в дельте Маккензи стано-

вятся накопителями тонкодисперсных наносов, которые частично выносятся водными потоками рукавов к МКД и аккумулируются на шельфе.

В формировании современной дельты Маккензи большую роль сыграло существенное послеледниковое повышение уровня океана (в период последнего оледенения район дельты длительное время был покрыт ледником). На побережье моря Бофорта в результате таяния ледника и сопутствующей эрозии изменилось направление течения рек с восточного на северное. В голоценовую поверхность дельты Маккензи развивается в послеледниковой низменной долине в форме языка между возвышенностями, сложенными плейстоценовыми отложениями на прибрежных равнинах Юкона и Тактояктук, и продолжается на устьевом взморье желобом Маккензи, сложенным более чем на 200 м позднеплейстоценовыми ледниковыми отложениями, перекрытыми голоценовыми дельтовыми наносами. Согласно [38], выдвигание конуса выноса Маккензи в море Бофорта с конца мелового периода очень незначительное —  $\sim 12$  км. Для сравнения, выдвигание конуса выноса Лены в море Лаптевых за последние 5–7 тыс. лет составило 120–150 км. Размыв берегов моря Бофорта со средней интенсивностью 1–2 м/год сопровождается отступанием некоторых участков МКД Маккензи. При этом в устьях основных рукавов отмечается активное накопление речных наносов, формирование и выдвигание в море устьевых баров, наращивание в длину и высоту некоторых островов на устьевом взморье. Заметное влияние на устьевые бары и



острова оказывают штормовые нагоны, приводящие нередко к полному затоплению островов.

Морфологические изменения гидрографической сети дельты Маккензи в настоящее время выражены в меандрировании рукавов, размыве вогнутых и намыве выпуклых берегов, образовании побочной и перекатных участков, а также сильной разветвленности [48]. Исследования морфологии рукавов дельты с помощью аэрофотоснимков участков от разделения рукавов Калинек и Восточного до аэропорта Тунунук (длиной ~156 км) в 2004 г., представленные в [26], показали, что в рукавах дельты образуются промоины ("scour holes") глубиной 9–33 м, представляющие угрозу для целостности трубопроводов. Эти промоины (17 в рук. Восточном и 1 в рук. Калинек) находятся вблизи излучин рукавов (в верхней части дельты), причем 3 из них наблюдались в 1985 г., а 15 – появились с 1985 по 2004 г. Размывы происходят при сужениях русла рукава, при слиянии рукавов и в крутых изгибах русла (чаще всего выше начала излучины по течению) и иногда сопровождаются образованием небольшого залива на внутренней стороне излучины, наличие которого определенно указывает на промоины [26]. Оценка мощности и локализации ледяных заторов показала, что промоины глубиной 25–30 м не могут образоваться в результате прорыва заторов. В [26] сделано предположение, что очень глубокая промоина может образоваться в местах, где рукав приближается к дельтовому озеру или уже окружил озеро, однако точная причина образования таких промоин не выявлена. По-видимому, причина образования промоин в рукавах дельты Маккензи – сочетание факторов: миграции рукавов дельты, увеличения площади термокарстовых озер и интенсификации термокарста при росте  $T$  воздуха. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о стабильности обнаруженных промоин.

#### ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ДЕЛЬТАХ РЕК ЛЕНЫ И МАККЕНЗИ ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

В настоящее время серьезно обсуждаются проблемы, связанные с глобальным изменением климата, а также с расширением использования водных ресурсов рек. Согласно современным расчетам [31], глобальная температура воздуха в приповерхностном слое  $T$  за 1880–2012 гг. возросла в среднем на  $0.85^{\circ}\text{C}$  (от  $0.65$  до  $1.06^{\circ}\text{C}$ ). При этом отмечено, что в последнее десятилетие рост  $T$  происходил интенсивнее – разница среднегодовой глобальной температуры воздуха, например за периоды 2003–2012 и 1850–1900 гг., составляет  $0.78^{\circ}\text{C}$  [31], а за 2017 г. и 1880–1920 гг. –  $1.17^{\circ}\text{C}$  [37].

Важным следствием потепления климата в XXI в. может стать существенное повышение

уровня Мирового океана и связанных с ним морей. Согласно [31], уровень Мирового океана за 1901–2010 гг. повысился в среднем на  $0.19$  м ( $0.17$ – $0.21$  м) с интенсивностью  $\sim 1.7$  мм/год. При этом средняя интенсивность роста уровня Мирового океана в последние десятилетия только увеличилась –  $2.0$  мм/год в 1971–2010 гг. и  $3.2$  мм/год в 1993–2010 гг. Основной причиной роста уровня в [31] считают тепловое расширение океана вследствие потепления климата ( $1.1$  мм/год) и таяние ледниковых щитов ( $0.76$  мм/год).

Согласно современным прогнозам [4, 31], глобальная  $T$  к концу XXI в. увеличится в среднем на  $1.5$ – $2.0^{\circ}\text{C}$ . Результаты моделирования в [6] показывают, что в арктической зоне потепление будет происходить с большей интенсивностью – от  $2.9$  до  $7.5^{\circ}\text{C}$  в бассейне Лены и от  $2.6$  до  $6.8^{\circ}\text{C}$  в бассейне Маккензи (в зависимости от сценария изменений климата). Рост  $T$  повлечет за собой изменения увлажненности суши – возрастет контраст между влажными и сухими ее участками. Потепление климата в арктической зоне вызовет дальнейшее образование промоин в водотоках дельт Лены и Маккензи и отступление берегов. Согласно прогнозу в [4], площадь, занятая ММП в мире, сократится к концу XXI в. в  $\sim 2$  раза, а глубина сезонного протаивания возрастет с  $1$ – $2$  до  $2$ – $2.5$  м. Увеличение толщины активного слоя и уменьшение мощности ММП, вплоть до полного их исчезновения, способствует сильному увлажнению, нестабильности поверхностного слоя грунта и повышенной эрозии, что в свою очередь приведет к увеличению потока наносов, поступающих в дельты рек.

Также прогнозируется повышение уровня Мирового океана на  $0.26$ – $0.82$  м (с интенсивностью  $9$ – $16$  мм/год) [31], увеличение водного стока рек в зонах достаточного и избыточного увлажнения и уменьшение – в зоне недостаточного увлажнения и в сухой зоне [9]. Результаты моделирования формирования стока в бассейнах рек Лены и Маккензи [6] показали увеличение нормы стока к концу XXI в., причем для Лены относительное увеличение нормы стока оказалось больше, чем для Маккензи. Авторы [6] объясняют это большей интенсивностью роста  $T$  и осадков в бассейне Лены. Повышение уровня океана, вызванное в том числе потеплением климата, приведет к усилению волнения на взморье и МКД Лены и Маккензи, эрозии берегов и отступанию МКД.

#### ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ физико-географических характеристик устьевых областей Лены и Маккензи показал, что несмотря на схожее высокоширотное расположение, климат и условия формирования стока воды и наносов, гидрологическим и морфологическим процессам в этих

устьях свойственны определенные различия. Неустойчивость субарктических геосистем, обусловленная развитием криогенных процессов и особенностями вертикальной структуры ММП, определяется изменением климата, колебанием уровня моря, а также оледенением. Сплошные ММП занимают в 3 раза большую площадь в бассейне Лены, чем в бассейне Маккензи. В дельтах Лены и Маккензи — обилие термокарстовых озер, образовавшихся в результате переработки ландшафта термокарстом. Доля площади озер в площади дельты р. Лены составляет ~11%, в то время как в средней дельте Маккензи эта доля достигает 50%. Обнаружено, что в результате роста  $T$  и таяния многолетних и сезонных мерзлых пород увеличиваются участки оползней грунта на берегах потоков и озер, а также площадь озер в дельте Маккензи. Эти процессы способствуют накоплению тонкодисперсных наносов в озерах, их последующему вкладу в сток наносов в море.

Средний многолетний сток воды в ВД Лены составляет 536 (1936–2011 гг.), Маккензи — 292 км<sup>3</sup>/год (1973–2011 гг.). В настоящее время наблюдается тенденция увеличения стока воды в обеих дельтах: Лены — на 0.19, Маккензи — на 0.21% среднемноголетнего значения.

Для обеих дельт характерно сосредоточение водного стока в магистральных рукавах (протока Трофимовская в дельте Лены и рук. Средний в дельте Маккензи) с тенденцией перераспределения расходов воды по смежным или второстепенным протокам в многоводный период.

Сток наносов в ВД Маккензи более чем в 6 раз больше стока наносов в ВД Лены, несмотря на почти вдвое больший сток воды Лены. Сток наносов в дельте Маккензи, максимальный среди рек субарктического региона, обеспечивается в основном большим  $W_R$ , приносимым левым притоком Лиард, протекающим по эрозионным грунтам. В то же время некоторый вклад в большую величину  $W_R$  в море Бофорта вносит широтная миграция границы распространения ММП, формирующая большое количество тонкодисперсных грунтов.

В дельте Лены наиболее активный вынос взвешенных наносов происходит в северо-восточном направлении (что обусловлено ее геоморфологическим строением), в дельте Маккензи — в западном и северо-западном (сосредоточение стока воды и наносов в системах рукавов Западного и Среднего). В целом за последние 5–7 тыс. лет выдвигание дельтового конуса выноса Лены в море составило 120–150 км, что в 10 раз превосходит выдвигание локальной дельты выполнения в рук. Восточном. Это связано, по-видимому, со сосредоточением потоков наносов в глубоководном желобе в бух. Маккензи (западная часть взморья), а также с аккумуляцией наносов в озе-

рах дельты Маккензи. Стабильное циклоническое течение в море Бофорта и активное морское волнение также не дают дельте Маккензи активно выдвигаться в море. Усилению размыва МКД способствует увеличение теплового стока рек, вызывающего таяние льдов вблизи устьевого взморья и изменяющего условия на морской границе дельты. Также к отступанию МКД Лены и Маккензи приводит разрушение сложенных льдистыми породами берегов морей Лаптевых и Бофорта при протаивании ММП.

Глубокие промоины, обнаруженные в рукавах дельты Маккензи, образовались, по-видимому, в результате присоединения дельтовых озер к водотокам или взаимодействия потока с карстовыми воронками в условиях потепления климата. Размыв в Сардахской протоке дельты Лены мог образоваться в результате прорыва мощного ледяного затора.

Дальнейшие возможные климатические изменения в арктическом регионе будут способствовать относительно быстрым изменениям гидрологических условий в устьях северных рек, особенно их ледотермического режима. Возможное потепление климата вызовет постепенную деградацию ММП в устьях рек Лены и Маккензи, а также Печоры, Яны, Индигирки, Колымы; дальнейшее отступление МКД скажется на береговой и склоновой эрозии в рукавах дельт и на межукавных пространствах, а также на морфологии и водном режиме дельтовых озер.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АИС ГМВО. <http://www.gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 28.11.2018)
2. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров В.И. и др. Климатические изменения в Арктике и северной полярной области // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. Т. 84. № 1. С. 67–80.
3. Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Куксина Л.В., Четверова А.А. Структура водотоков в дельте Лены и ее влияние на процессы трансформации речного стока // География и природ. ресурсы. 2014. № 1. С. 91–99.
4. Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние климатических изменений над сушей внетропических широт на динамику многолетнемерзлых грунтов при сценариях RCP в XXI в. по расчетам глобальной климатической модели ИФА РАН // Метеорология и гидрология. 2013. № 7. С. 31–42.
5. Большианов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: ААНИИ, 2013. 268 с.
6. Гельфан А.Н., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Лавренов А.А., Мотовилов Ю.Г. Гидрологические последствия изменения климата в крупных речных бассейнах: опыт совместного использования региональной гидрологической и глобальных климатических моделей // Вопросы географии. Сб. 145. Гидрологи-

- ческие изменения. М.: Изд. дом “Кодекс”, 2018. С. 49–63.
7. *Георгиади А.Г., Кашутина Е.А.* Многолетние изменения годового и сезонного стока рек бассейна Лены // Изв. РАН. Сер. Географическая. 2014. № 2. С. 71–83.
  8. *Добровольский С.Г.* Глобальная гидрология. Процессы и прогнозы. М.: ГЕОС, 2017. 526 с.
  9. *Добровольский С.Г.* Проблема глобального потепления и изменения стока Российских рек // Вод. ресурсы. 2007. Т. 34. № 6. С. 643–655.
  10. *Долгополова Е.Н.* Напряжение трения на дне подледного потока и его воздействие на условия жизни биоты в реках // Вод. ресурсы. 2002. Т. 29. № 3. С. 311–318.
  11. *Долгополова Е.Н.* Роль многолетнемерзлых пород в формировании гидролого-морфологического режима устьев рек водосбора Северного Ледовитого океана // Арктика: экология и экономика. 2018. № 4 (32). С. 70–85.
  12. *Жигарев Л.А.* Океаническая криолитозона. М.: Изд-во МГУ, 1997. 320 с.
  13. *Кортаев В.Н.* Голоценовая история речных дельт Арктического побережья Сибири // География и природ. ресурсы. 2011. № 3. С. 13–20.
  14. *Кортаев В.Н., Бабич Д.Б.* Специфика процессов дельтообразования в криолитозоне // Тр. III Всерос. конф. “Ледовые и термические процессы на водных объектах России”. Онега: Изд-во ИВП РАН, 2011. С. 384–389.
  15. *Кусатов К.И., Аммосов А.П., Корнилова З.Г., Шпакова Р.Н.* Изменения уровней воды и уклонов водной поверхности при заторных явлениях на р. Лена // Вод. ресурсы. 2013. Т. 24. № 2. С. 241–249.
  16. *Магрицкий Д.В.* Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты на Нижней Лене и Вилюе // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 6. С. 85–95.
  17. *Михайлов В.Н.* Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
  18. *Михайлова М.В.* Гидрологические характеристики устьевой области Макензи // Вод. ресурсы. 1997. Т. 24. № 2. С. 241–249.
  19. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России / Под ред. *Д.В. Козлова*. М.: Изд-во РГАУ–МСХА, 2015. 348 с. 20.
  20. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования. Отчет Совета Гринпис. М.: ОМННО, 2010. 43 с.
  21. *Павлов А.В.* Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Гео, 2008. 229 с.
  22. *Павлов А.В., Малкова Г.В.* Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Earth’s Cryosphere. Новосибирск: Гео, 2009. Т. XIII. № 4. С. 32–39.
  23. Реки и озера мира. Энциклопедия. М.: Энциклопедия, 2012. 928 с.
  24. *Савельева Н.И., Салюк А.Н., Пропп Л.Н.* Особенности термохалинной и гидрохимической структуры вод юго-восточной части моря Лаптевых // Океанология. 2010. Т. 50. № 6. С. 918–925.
  25. *Федорова И.В., Большианов Д.Ю., Макаров А.С., Третьяков М.В., Четверова А.А.* Современное гидрологическое состояние дельты Лены. Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики. М.: Изд-во МГУ, 2009. С. 278–291.
  26. *Beltaos S., Carter T., Prowse T.* Morphology and genesis of deep scour holes in the Mackenzie Delta // Can. J. Civ. Eng. 2011. V. 38. P. 638–649.
  27. *Blackburn J., She Y., Hicks F., Nafziger J.* Ice Effects on Flow Distributions in the Mackenzie Delta // Proc. 18th Workshop Hydraulics Ice Covered Rivers. Quebec City, Canada: CRIPPE Press, 2015. P. 1–15.
  28. *Brown J., Ferrians Jr., Heginbottom J.A., Melnikov E.S.* Circum-arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions // Boulder CO: National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology. Digital media. 1998. Revised February 2001. P. 1–11. <https://databasin.org/datasets/1f624a31ab224835a78ad4bf11103419> (дата обращения: 14.10.2018)
  29. *Burn C.R., Kokelj S.V.* The environmental and permafrost of the Mackenzie delta area // Permafrost and periglacial processes. 2009. V. 80. P. 83–105.
  30. *Carson M.A., Jasper J.N., Conly F.M.* Magnitude and sources of sediment input to the Mackenzie Delta, Northwest Territories, 1974–94 // Arctic. 1998. V. 51. P. 116–124.
  31. Climate Change 2012: The Physical Science Basis. <http://www.ipcc.ch> (дата обращения: 18.09.2018)
  32. *Coleman K.A., Palmer M.J., Korosi J.B. et al.* Tracking the impacts of recent warming and thaw of permafrost peatlands on aquatic ecosystems: a multi-proxy approach using remote sensing and lake sediments // Boreal Environ. Res. 2015. V. 20. P. 363–377.
  33. GRDC. 2012. <http://grdc.bafg.de> (дата обращения: 08.09.2018)
  34. *Dolgoplova E.N.* Climate changes impact on river mouths in permafrost zone in Russia // Proc. 20th IAHR Int. Sympos. Ice. Lahti, Finland, 2010. V. I. P. 1–12.
  35. *Dolgoplova E.N.* Sediment flow at the river mouths of the permafrost zone // Proc. 10th Int. SedNet Conf. “Sediments on the move”. Genoa, Italy, 2017.
  36. *Doxaran D., Devred E., Babin M.* 50% increase in the mass of terrestrial particles delivered by the Mackenzie River into the Beaufort Sea (Canadian Arctic Ocean) over the last 10 years // Biogeosci. 2015. № 12. P. 3551–3565.
  37. *Hansen J., Sato M., Kharecha P. et al.* Young people’s burden: Requirement of negative CO<sub>2</sub> emissions // Earth Syst. Dynam. 2017. V. 8. P. 577–616.
  38. *Hill P.R., Lewis C.P., Desmarais S., Kauppaymuthoo V., Rais H.* The Mackenzie Delta: sedimentary processes and facies of a high-latitude, fine-grained delta // Sedimentol. 2001. V. 48. P. 1047–1078.
  39. *Hopky G.E., Chipczak D.B., Lawrence M.J.* Seasonal salinity, temperature and density data for the Canadian

- Beaufort Sea shelf 1987 // Canadian Data Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 712. Winnipeg: Fisheries and Oceans Press, 1988. 21 p.
40. *Macdonald R.W., Solomon S.M., Cranston R.E. et al.* A sediment and organic carbon budget for the Canadian Beaufort Shelf // *Marine Geol.* 1998. V.144. № 4. P. 255–273.
  41. *Magritsky D., Mikhailov V., Korotaev V. et al.* Changes in hydrological regime and morphology of river deltas in the Russian Arctic // *Proc. HP1. IAHS-IAPSO-IASPEL Assembly.* Gothenburg, Sweden: IAHS Press, 2013. P. 67–79.
  42. *Morse P.D., Burn C.R., Kokelj S.V.* Influence of snow on near-surface ground temperatures in upland and alluvial environments of the outer Mackenzie Delta, Northwest Territories // *Can. J. Earth Sci.* 2012. V. 49. № 8. P. 895–913.
  43. *Osborne P.D., Forest A.* Sediment Dynamics from Coast to Slope – Southern Canadian Beaufort Sea // *J. Coastal Res.* 2016. № 75 (Special Iss.). P. 537–541.
  44. *Rennie C.D., Ahsan M.R., Laurent M. St.* Sediment Transport in a Northern Regulated Semi-Alluvial River // *Proc. 34th IAHR World Congress “Balance and Uncertainty”.* Brisbane, Australia, 2011. P. 3737–3744.
  45. *Rood S.B., Kaluthota S., Philipson L.J., Rood N.J., Zanewich K.P.* Increasing discharge from the Mackenzie River system to the Arctic Ocean // *Hydrol. Processes.* 2017. V. 31. P. 150–160.
  46. *Smith S.L.* Trends in permafrost conditions and ecology in northern Canada. Canadian Biodiversity: Ecosystem Status and Trends. Techn. Thematic Rep. No. 9. Ottawa: Canadian Councils of Resour. Ministers, 2011. 27 p.
  47. *Smith S.L., Burgess M.M.* Mapping the response of permafrost in Canada to climate warming // *Geol. Survey of Canada.* 1999. P. 163–171.
  48. *Vesakoski J.M., Nylén T., Arheimer B. et al.* Arctic Mackenzie Delta channel planform evolution during 1983–2013 utilising Landsat data and hydrological time series // *Hydrol. Processes.* 2017. V. 31. P. 3979–3995.
  49. *Vonk J.E., Giosan L., Blusztajn J. et al.* Spatial variations in geochemical characteristics of the modern Mackenzie Delta sedimentary system // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2015. № 171. P. 100–120.
  50. *Walker T.R., Grant J., Jarvis P.* Approaching Freshet beneath Landfast Ice in Kungallit Bay on the Canadian Arctic Shelf: Evidence from Sensor and Ground Truth Data // *Arctic.* 2008. V. 61. № 1. P. 76–86.
  51. *Walvoord M.A., Kurylyk B.L.* Hydrologic Impacts of Thawing Permafrost – A Review // *Soil Sci. Society of America.* 2016. V. 15. № 6. 20 p. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.01.0010>
  52. *Yang D., Marsh P., Ge S.* Heat flux calculations for Mackenzie and Yukon Rivers // *Polar Sci.* 2014. V. 8. P. 232–241.
  53. [www.earthobservatory.nasa.gov/images/83271/river-discharge-alters-arctic-sea-ice](http://www.earthobservatory.nasa.gov/images/83271/river-discharge-alters-arctic-sea-ice) (дата обращения: 12.02.2019)
  54. [www.r-arcticnet.sr.unh.edu](http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu) (дата обращения: 29.01.2019)
  55. <https://wateroffice.ec.gc.ca> (дата обращения: 02.02.2019)
  56. [https://yandex.ru/maps/?l=sat&ll=127.905683%2C72.775179&utm\\_source=main\\_stripe\\_big&z=8](https://yandex.ru/maps/?l=sat&ll=127.905683%2C72.775179&utm_source=main_stripe_big&z=8) (дата обращения: 06.09.2020)