

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-171-190>

УДК [556.535+556.5.02]:556.54(282.256.67)



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Новые данные о трансформации стока воды и наносов в дельте реки Лены по итогам экспедиционных измерений в августе 2022 г.

Д.В. Магрицкий^{1,2}, С.Р. Чалов¹, Е.Ж. Гармаев³,
К.Н. Прокопьева¹, Е.А. Крастынь¹*

¹ — Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² — Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

³ — Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Россия

**magdima@yandex.ru*

Резюме

Статья содержит важные итоги полевых и комплексных гидрологических исследований, проводившихся в дельте р. Лены с 10 по 16 августа 2022 г. Были измерены 25 расходов воды и концентрации взвесей в речных водах, отобраны пробы воды, образцы донного и берегового грунтов на гранулометрический и химический состав, отмечены размываемые берега. Целью исследований было изучение распределения стока воды и наносов Лены между дельтовыми рукавами, изменений мутности воды, гранулометрического и химического состава наносов от вершины к морскому краю дельты, по глубине и ширине потока, роли в них местных гидролого-морфологических и термоабразионных процессов. Полученные натурные данные необходимы для познания особенностей современного рассредоточения стока воды и наносов в огромной и многорукавной дельте Лены, его изменений с момента последних стационарных и экспедиционных измерений, для дешифрирования спутниковых снимков, разработки инструментария для пересчета поверхностных измерений в осредненные по сечению потока.

Ключевые слова: взвесь, дельта, измерение, мутность, проба воды и грунта, расход воды, река Лена, рукав, скорость течения.

Для цитирования: *Магрицкий Д.В., Чалов С.Р., Гармаев Е.Ж., Прокопьева К.Н., Крастынь Е.А.* Новые данные о трансформации стока воды и наносов в дельте реки Лены по итогам экспедиционных измерений в августе 2022 г. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 2. С. 171–190. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-171-190>.

Поступила 20.05.2023

После переработки 14.06.2023

Принята 15.06.2023

New data on the transformation of water and sediment runoff into the Lena river delta based on the results of expedition measurements in August 2022

Dmitry V. Magritsky^{1,2*}, Sergei R. Chalov¹, Endon Zh. Garmaev³,
Kristina N. Prokopeva¹, Ekaterina A. Krastyn¹

¹ — Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² — Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia

³ — Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

*magdima@yandex.ru

Summary

Field hydrological measurements were performed in the Lena River delta from the 10th to the 16th of August 2022. 25 values of water discharge and 58 suspended sediment concentrations (SSC) were measured, multiple chemical composition water samples were taken, along with samples of bottom and bank river sediments, and thermal abrasion coasts were highlighted. Particle size and chemical composition analyses of the sediment samples were carried out. The aim of the study was to estimate the water flow distribution in the delta and to determine the directional SSC, sediment particle size and chemical composition changes along the delta and inside the depth of the river flow, and define the roles of the local hydrological and morphological factors of river flow transformation. Moreover, field measurements are crucial for SSC estimation and monitoring based on satellite image data. The laboratory analyses included particle size definition in suspended and bottom sediment samples, organic matter and SSC definition. The August 2022 expedition results were compared to the previous surveys. It was established that the flow distribution around the Stolb island corresponds with that of 2016: the Bykovsky, Trophimovsky, Tumatsky and Oleneksky branches receive 24.9–25.5, 58–59.2, 6 and 6.6 % of the water discharge from the Kusur gauging station on the Lena River, respectively. However, the role of the Main channel was slightly overestimated. The new data includes water discharges in the branches around the Samoilovsky island and in the channel systems of the Oleneksky and Tumatsky branches. SSC was relatively low and amounted to around 12–24 mg/l, rising from the water surface to the bottom 1.2–2 times. SSC decreased along the course of the Oleneksky and Tumatsky branches (1.5 and 1.1 times, respectively) due to the ratio between SSC and the potential stream transport capacity. SSC rose along the course of the Bykovsky branch, even though it wasn't shown by the Landsat-8 satellite image (16th of August 2022). A significant sediment source in the delta are eroded and thermo eroded shores of the edoma island systems. The average sediment size proved to be from 0.011 to 0.019 mm. SSC does not vary much around the main channel and the nearest branches. Important relations between SSC, optical turbidity and ADCP backscatter intensity were estimated. The coarse diameter of 30 bottom sediment samples was 0.46 mm. The largest sediments were discovered in the Bykovsky branch, while the smallest sediments were found in the smaller transverse branches. Along the Tumatsky and Oleneksky branches the bottom sediments alternate from fine to medium sands.

Keywords: branch, delta, flow velocity, Lena River, measurement, sediment, suspended sediment concentration, water discharge, water and sediment samples.

For citation: Magritsky D.V., Chalov S.R., Garmaev E.Zh., Prokopeva K.N., Krastyn E.A. New data on the transformation of water and sediment runoff into the Lena river delta based on the results of expedition measurements in august 2022. *Arctic and Antarctic Research*. 2023, 69 (2): 171–190. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-171-190>.

Received 20.05.2023

Revised 14.06.2023

Accepted 15.06.2023

ВВЕДЕНИЕ

Дельта р. Лены — крупнейшая в стране по площади и числу рукавов, она уникальна по своему строению и истории образования, по своей экологической ценности

и другим характеристикам [1–5]. Дельта расположена в Российской Арктике, быстро теплющей и «теряющей» морские льды, в криолитозоне с отступающей мерзлотой, в устье второй по водоносности реки России, сток и режим которой с конца 1980-х гг. значительно меняется [6]. Все это создает условия для серьезных и нарастающих местных гидролого-морфологических изменений, влияющих на русловые процессы и распределение стока между русловыми системами, на характер продольной (между вершиной и морским краем дельты) трансформации речного стока наносов, растворенных веществ и тепловой энергии, на состояние прибрежной арктической морской акватории, судоходство и в целом на экологические условия и обитателей дельты. Эти нарушения, как и сама дельта, по-прежнему известны недостаточно, хотя в сравнении с другими арктическими дельтами степень ее гидрологической изученности несравнимо выше [1, 2, 5–13]. Стоковые посты и гидрометрические створы в дельте не функционируют с 2007 г.; комплексные гидрологические экспедиции проводились довольно давно; с 2022 г. заморожено российско-германское сотрудничество. Поэтому проведенные в августе 2022 г. гидрологические исследования не только были своевременны, но и стали источником новых знаний о современном гидрологическом состоянии южной части дельты Лены. Целью исследований было изучение распределения стока воды и наносов Лены между дельтовыми рукавами, продольных и по глубине изменений мутности воды и роли в них местных гидролого-морфологических процессов, определение гранулометрического и химического состава наносов, донных и береговых отложений, получение натуральных опорных сведений для дешифрирования спутниковых снимков. В задачи представленного исследования также вошел детальный сравнительный анализ полученных во время экспедиции данных и результатов их лабораторной и камеральной обработки с материалами ранее проводившихся похожих исследований.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКИ

Полевые гидрологические исследования проводились в восточном и среднем секторах дельты р. Лены с 10 по 16 августа 2022 г. (рис. 1). Крайней восточной и одновременно крайней южной точкой района работ был южный берег зал. Неёлова (к северу от пгт Тикси; с координатами 71,75° с. ш. и 128,86° в. д.), крайней западной точкой — гидроствор на Оленёкской протоке, в 3 км ниже впадения в нее Булкурской протоки (72,31° с. ш. и 126,07° в. д.), крайней северной точкой — створ на Большой Туматской протоке (72,71° с. ш.). Общая протяженность маршрута работ «на воде» составила около 530 км. В числе исследованных водных объектов были зал. Неёлова, концевой участок Главного русла р. Лены, Быковская, Оленёкская, Булкурская, Большая и Малая Туматская и Арынская (в истоке) протоки (прим. авторов статьи — в действительности это типичные дельтовые рукава, согласно георетическим положениям отечественной устьевой гидрологии [4]), а также протоки, огибающие о. Самойловский, и ряд др. Особо следует выделить главный дельтовый узел разветвления у о. Столб. Полевой отряд базировался на о. Самойловский — на базе научно-исследовательской станции (НИС) «Остров Самойловский» Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Полевые выезды выполнялись на моторном катере. Во время них, во-первых, были обустроены на о. Самойловский и о. Арга-Билир-Арыта водомерные посты, оборудованные датчиками уровня воды серии ERG-TP-01 (создатель — биологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова). На них осуществлялся непрерывный

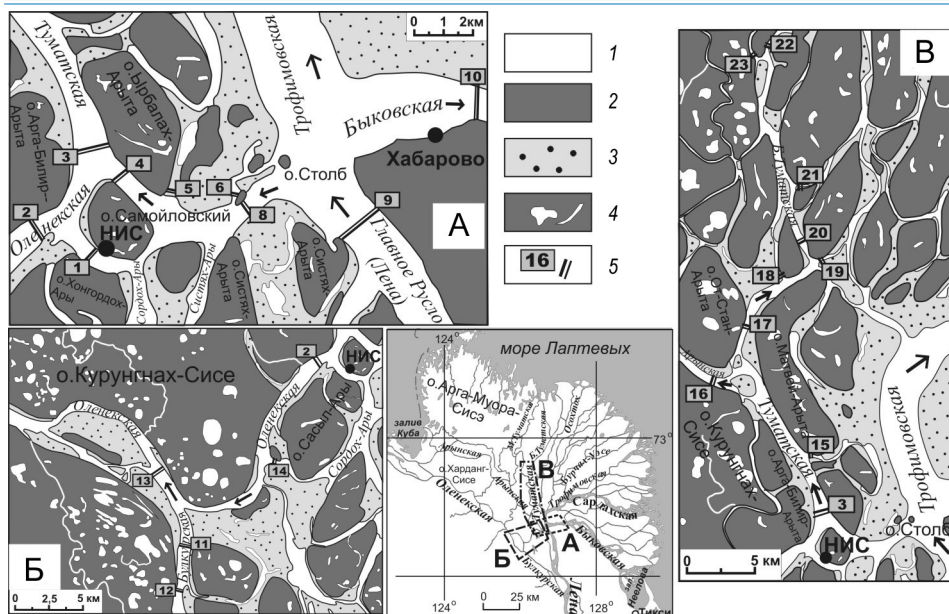


Рис. 1. Картограмма участков дельты р. Лены, где в августе 2022 г. проводились гидрологические работы.

1 — акватория (в межень и на врезках А, Б и В); 2 — острова; 3 — обсыхающие (при низких уровнях) разновысотные пески; 4 — термокарстовые и старичные озера на островах, а на песках — это заполненные водой понижения; 5 — местоположение и номера расходных гидростворов

Fig. 1. Map of the August 2022 hydrological survey sites in the Lena River Delta.

1 — water area (at low water conditions and insets А, Б, В); 2 — islands; 3 — drying out (during low water levels) sands; 4 — thermokarst and oxbow island lakes, water filled downgrades; 5 — water discharge measurement sites and their numbers

мониторинг температуры и уровня воды (в условной системе высот). В Оленёкской протоке, восточнее о. Самойловский, была установлена авторская зонд-ловушка (патент № 201927 от 29.05.2020 г.) для сбора взвешенных наносов на трех глубинных горизонтах. Во-вторых, были измерены 25 расходов воды и скоростей течения — с помощью акустического доплеровского профилографа течений (АДПТ) RioGrande, двумя-тремя проходами и с соблюдением для одного узла или вдоль рукава правила «синхронности измерений» [4]. Расхождение между расходами воды разных проходов было допустимым по РД 52.08.767-2012 [14] ($\pm 10\%$ между проходами и $\pm 5\%$ от среднего) на большинстве гидростворов. Несколько расходов признаны либо ничтожно малыми (створы № 6 и 7 на малых протоках у истока Оленёкской протоки (см. рис. 1, врезка А)), либо неверными из-за сильного влияния гидролого-морфологических факторов (одно измерение в устье Булкурской протоки и несколько измерений в малых протоках в системе Туматской протоки). В-третьих, проведены 58 измерений оптической мутности воды при помощи турбидиметра НАСН 2100р. В самых глубоких местах на створах взяты пробы воды — погружной помпой, из поверхностного, придонного и среднего горизонтов. Вода забиралась в подготовленные емкости объемом 1 или 5 л. В-четвертых, пробоотборником типа ковш Ван-Вина отобраны донные отложения, а на термоэрозионных берегах — образцы грунта. Вес отбираемой пробы около 0,5 кг. Всего было взято 30 образцов грунтов. В-пятых, во

время маршрутов наносились на карту участки термоэрозионных берегов. Эхолотом GARMIN измерялись глубины по фарватеру.

На НИС «Остров Самойловский» пробы воды с содержащимися в них наносоми фильтровались через вакуумную установку Millipore и мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм производства Владипор (Россия) и Millipore (Франция). Грунты, донные отложения, фильтры Владипор с уловленными взвешями высушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °С — 2 ч для фильтров и 8–24 ч для грунтов. Фильтры взвешивались на электронных аналитических весах с точностью до 0,0001 г. По массе осевших на фильтре наносов и объему пробы рассчитывалась весовая мутность. Сопоставление данных по весовой (S , мг/л) и оптической (T , NTU) мутности позволило обосновать эмпирическую зависимость вида:

$$S = 1,33 \cdot T - 2,45 \text{ (коэффициент достоверности связи } r^2 = 0,88). \quad (1)$$

Также обосновывалась зависимость между измеренной поверхностной мутностью и значениями спектральной яркости на снимке Landsat 8.

Донные грунты были проситованы через сита размерами: >10 мм, 5–10 мм, 2–5 мм, 1–2 мм, 0,5–1 мм, 0,25–0,5 мм, 0,1–0,25 мм и <0,1 мм. После — рассчитывался средневзвешенный диаметр отложений. Береговые грунты сжигались в муфельной печи при температуре 550 градусов в течение 1 ч для установления доли органики (торфа) в них. Часть проб воды, наносов и грунтов, фильтрата (после фильтрование через фильтры Millipore) была отвезена в Москву для расширенного анализа — на химический состав и гранулометрический (для мелких взвесей) — в лабораториях МГУ им. М.В. Ломоносова. Последний определялся методом лазерной дифракции на лазерном гранулометре Fritsch Analysette 22. Каждое определение состояло из трех-пяти измерений, результаты которых усреднялись.

Расчет распределения расходов воды (Q , м³/с) в узлах разветвлений и соединений выполнялся с опорой на водно-балансовые решения. Расход взвешенных наносов в гидростворах определялся пересчетом величины рассеяния частицами взвесей ультразвукового сигнала, излучаемого АДПТ в водный поток, в мутность [15]. Для этого вначале была построена единая зависимость между фактическими мутностями воды, полученными в ходе измерений (на трех глубинных горизонтах на вертикали, на каждом гидростворе), и величинами обратного рассеяния на эхограмме (в точках отбора пробы воды). По этой зависимости величины обратного рассеяния в каждой ячейке эхограммы были пересчитаны в мутность воды и представлены в виде изолиний мутности в поперечном створе. В программном комплексе (ПК) ASET [16] по этим и другим данным, включая скорости течения и расходы воды, гранулометрический состав взвесей, рассчитывался расход взвешенных наносов (R , кг/с). Для экстраполяции скоростей в приповерхностном и придонном слоях использована логарифмическая зависимость, а для экстраполяции мутности — закон Великанова–Рауза. В ходе расчетов выяснилось, что ПК ASET учитывает только крупные (руслообразующие) взвеси и, следовательно, выдает заниженный расход наносов. Но это тоже важный методический результат.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВО ВРЕМЯ ПОЛЕВЫХ РАБОТ

В среднемноголетнем масштабе погода в дельте р. Лены отличается суровостью и неустойчивостью из-за особенностей местонахождения района — в Арктике, на границе обширной суши и ледовитого моря, в устье крупнейшей реки. Обычно ав-

густ (наряду с июлем) характеризуется самыми высокими температурами воздуха — +8...+9 °С на метеостанции (МС) Тикси — и началом ее быстрого снижения примерно с середины месяца, наибольшим количеством осадков и почти сплошной облачностью (ясных дней в среднем пять), ветреной погодой (штилевых дней четыре) с преобладанием северных ветров [17]. Далее по повторяемости следуют Ю, ЮЗ и З ветры.

Во время экспедиции большую часть времени преобладал антициклональный тип погоды, с переменной облачностью — от 25–75 % 11, 13 и 15–16 августа до 100 % 12 и 14 августа (рис. 2б). Осадки прошли 12 августа; сильное усиление ветра отмечено 14 августа — со средней скоростью 8–10 м/с и порывами до 12–13 м/с, со сменой направления на восточное, т. е. вдоль Быковской и Оленёкской проток. Это резко усилило волнение в этих рукавах и ограничило работу «на воде». В остальные дни господствовали ветра северных румбов, со скоростью 2–5 м/с, не мешавшие работе. Температурный фон был благоприятным: с 11 по 13 августа температура воздуха понизилась с 11,8 до 7,6 °С (полярная станция (п. ст.) Хабарово), а к 16 августа вновь выросла — до 13,2 °С (см. рис. 2а). В течение суток диапазон колебаний составлял 5–9 °С; на метеостанции Тикси он немного меньше.

Экспедиционный выезд пришелся на летне-осенний сезон паводков и послепаводочного снижения уровня воды. В низовьях и особенно в дельте р. Лены

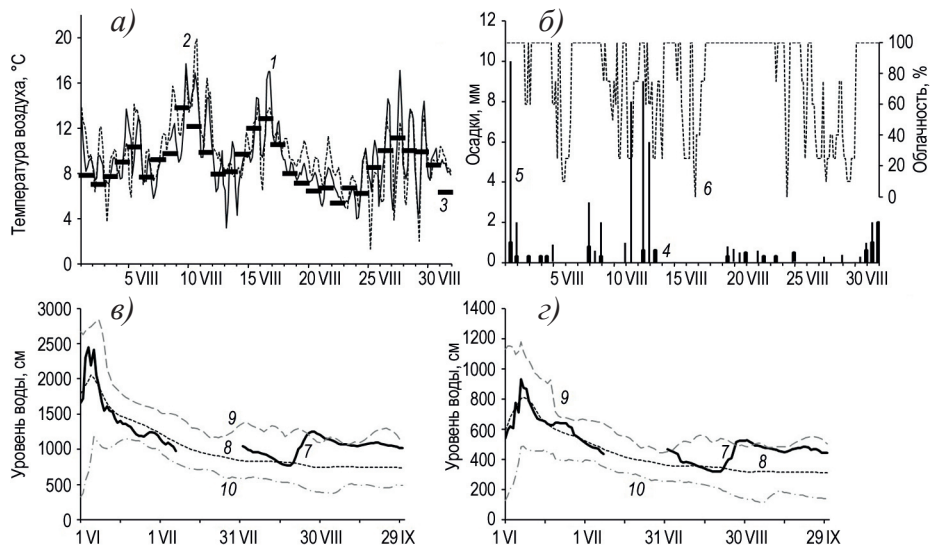


Рис. 2. Гидрометеорологические условия летом 2022 г. по данным наблюдений на пунктах Росгидромета и экспедиционных измерений: а — температура воздуха в августе на постах о. Столб (1, по срокам), Тикси (2, по срокам) и по данным реанализа ERA5 (3, вся дельта и с осреднением за сутки); б — суточный слой осадков (4 — о. Столб, 5 — Тикси) и облачность (6 — о. Столб); в, з — среднесуточные уровни воды на постах Кюсюр (в) и Хабарово (з): 7 — летом 2022 г., 8, 9, 10 — осредненные, максимальные и минимальные за 1991–2020 гг.

Fig. 2. Hydrometeorological conditions in the summer of 2022 based on Roshydromet and field data: а — August temperature from the “Stolb island” gauging station (1, air temperature measurements), Tiksi gauging station (2, air temperature measurements) and based on ERA5 reanalysis (3, the entire delta, daily); б — daily precipitation (4 — Stolb island, 5 — Tiksi) and cloudiness (6 — Stolb island); в, з — average daily water level from Kusur (в) and Khabarovo (з) gauging stations: 7 — summer 2022, 8, 9, 10 — average, maximum and minimum water levels from 1991 to 2020

паводки распластанные, в среднем их четыре [18]. В 2022 г. пик весеннего половодья наблюдался на постах Кюсюр и п. ст. Хабарово в первых числах июня, а его окончание — во второй половине июля (см. рис. 2*в, з*). К сожалению, Росгидромет не приводит данные наблюдений за июль. Половодье сменилось паводочной волной, спад которой пришелся как раз на экспедиционные работы; в третьей декаде августа пришла вторая паводочная волна. Во время экспедиции, с 11 по 16 августа, уровень снизился почти на 40 см, как по данным измерений на посту Хабарово (были любезно предоставлены наблюдателями), так и по логгерам, установленным участниками экспедиции. 13 и, особенно, 14 августа флуктуации уровня резко выросли из-за усиления ветра. В целом хорошо видно, что гидрологические условия соответствовали средним многолетним (см. рис. 2*в, з*).

Во всех пунктах температура воды превышала температуру воздуха на 4–7 °С; внутрисуточная изменчивость находилась в диапазоне 0,5 °С. Во время экспедиции температура воды (по логгерам) вначале снизилась с 16,5–16,8 °С (с 11–12 августа) до 15 °С (14–15 августа) и вновь немного выросла (на 0,2–0,4 °С) в остальные дни. Запоздывание, по сравнению с колебаниями температуры воздуха, составило 1–2 суток. Различия в температурах воды у о. Самойловский и п. ст. Хабарово оказались незначительными, тогда как, по измерениям температурным датчиком АДПТ, температура воды по ширине потока и между гидрометрическими створами сильно различалась. Самые холодные воды обнаружены в Булкурской протоке — 13,0–13,5 °С (рис. 3). В Главном русле у правого берега выявлен шлейф холодных вод шириной почти 0,4 км, который, по-видимому, тянется от поста Кюсюр и формируется водами водо-

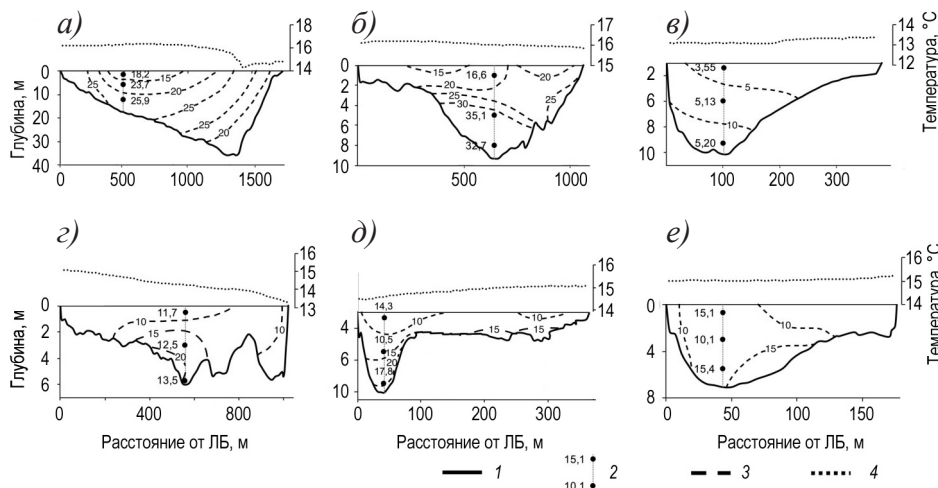


Рис. 3. Поперечные профили гидростворов с линией дна (1), значениями измеренной на вертикалях весовой мутности (2), изолиниями равной мутности (3) и кривой изменения приповерхностной температуры воды (4). Створы: а — Главное русло (створ Л-9), б — Туматская протока (створ Л-3), в — Булкурская протока (створ Л-12), з — Оленёкская протока (створ Л-13), д — Арынская протока (створ Л-16), е — Туматская протока (створ Л-22)

Fig. 3. Hydrological site transverse profiles and their bottom line (1), measured SSC (2), isolines of equal SSC (3), based on SSC echograms, and surface water temperature curve (4). Transverse profiles: а — Main channel (L-9), б — Tumatskaya branch (L-3), в — Bulkurskaya branch (L-12), з — Olenekskaya branch (L-13), д — Arynskaya branch (L-16), е — Tumatskaya branch (L-22)

токов, стекающих с Верхоянского горного массива [6]. Наоборот, на посту Хабарово (на Быковской протоке) такой зоны нет, что соответствует выводу из [6]. В Оленёкской протоке, от левого берега к правому, т. е. к едомным массивам с тающими многолетнемерзлыми породами (ММП), температура воды уменьшается на 2 °С.

СКОРОСТНОЕ ПОЛЕ ПОТОКА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТОКА ВОДЫ В ДЕЛЬТЕ

Во время экспедиции на 25 гидрометрических створах несколькими проходами были измерены расходы воды (см. рис. 1, таблица). 12 августа измерения выполнялись вокруг о. Самойловский и в главном дельтовом узле разветвления — у о. Столб; 13 августа — на верхнем участке Оленёкской протоки и в Булкурской протоке; 15 августа — в верхней части системы Туматской протоки, 16 августа — вновь к югу от о. Самойловский. Полученный массив данных позволил изучить современную ситуацию с рассредоточением стока Лены в привершинной части дельты, частично — по длине Оленёкской и Туматской проток.

О распределении стока в дельте Лены научное сообщество знает по-прежнему мало. И это несмотря на то, что дельта Лены одна из немногих в Арктике, где измерения расходов воды на постоянной основе все же проводились [13, 19]. В 1950 г. в истоке Быковской протоки был открыт стоковый пост о. Столб (сейчас это полярная станция им. Ю.А. Хабарова) и гидроствор на Главном русле. С 1973 г. Тиксинский ЦГМС начал проводить эпизодические, а с 1977 г. систематические измерения Q в истоках проток Трофимовской, Туматской и Оленёкской — на закрепленных гидростворах. Но после 2007 г. все стационарные измерения Q прекратились. Помимо сетевого мониторинга, большой объем измерений Q выполнен во время экспедиций, причем на большем числе водотоков и створов [1, 2, 7, 9, 20]: 1) в 1976–1987 гг. гидрографической партией Тиксинского ЦГМС, 2) в 1979–1981 и 1994–1995 гг. Лабораторией русловых процессов и эрозии почв МГУ им. М.В. Ломоносова, 3) в отдельные годы с 2001 по 2016 г. в рамках российско-германского сотрудничества — силами ААНИИ, СПбГУ и др. Последнее крупное обобщение всех имеющихся (стационарных и экспедиционных) данных по Q в рукавах дельты Лены опубликовано в [6] — в виде соответствующей таблицы перехода от расходов и уровней воды на посту Кюсюр к Q в главных дельтовых рукавах. Там же дан анализ устойчивости этого распределения в многолетнем и сезонном временных масштабах. Предыдущие обобщения содержатся в публикациях [1, 2, 7, 11, 12, 18, 19], среди которых выделяются работы [1, 7] со сведениями по распределению стока для максимального числа рукавов и узлов (разветвления и соединения). О расходах воды в рукавах, где гидрометрические измерения не проводились, можно составить приблизительное представление на основе альтернативных данных, полученных по гидролого-морфологическим зависимостям [7], на базе концепции гидрографических порядков [21] и по результатам численных гидродинамических расчетов [22].

При обработке и анализе данных измерений в августе 2022 г. прежде всего необходимо было соотнести распределение Q между рукавами с расходами воды на посту Кюсюр. Это замыкающий створ на р. Лене, который находится перед входом реки в «Ленскую трубу» и в 145 км выше вершины дельты (у о. Тит-Ары), в 315 км от устья Быковской протоки [6]. За август 2022 г. имелись лишь среднесуточные уровни на посту Кюсюр, импортированные с сайта «Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России» [23]. Они были пересчитаны в среднесуточные Q по кривой расходов воды (КР). КР не обеспечена данными за

Таблица

Table

Данные измерений характеристик речного потока в гидростворах в дельте р. Лены

Data of field measurements of river flow characteristics in site transverse profiles

№ створа	Водоток, створ	Координаты		Дата	Ширина русла, м	Глубина, м		Расход воды, м ³ /с	Скорость течения, м/с	
		с. ш.	в. д.			средняя	максим.		средн.	максим.
1	Протока, огибающая о. Самойловский с юга	126,4644	72,3700	12.08	595	3,77	5,4	1170	0,52	1,24
2	Оленёкская протока (исток)	126,4150	72,3732		961	5,18	9,8	1060	0,21	1,00
3	Туматская протока (исток)	126,4660	72,4034		1078	4,94	9,8	2020	0,38	1,19
4	Протока, огибающая о. Самойловский с севера	126,4965	72,3952		705	5,42	10,5	2000	0,52	1,37
5	Безымянные протоки	126,5489	72,3856		210	2,66	4,7	3,72	0,01	—
8	Общий вход в Оленёкскую и Туматскую протоки	126,6378	72,3769		626	8,75	17,7	3310	0,60	1,49
9	Главное русло (4,7 км выше о. Столб)	126,7094	72,3733		1623	21,0	36,9	31250	0,92	2,96
10	Быковская протока (исток)	126,8153	72,4413		2557	4,35	15,2	8400	0,75	2,01
12	Булкурская протока (устье)	126,1046	72,2293	13.08	411	7,08	14,3	175	0,06	0,90
13	Оленёкская протока (ниже впадения Булкурской)	126,0723	72,3063		1106	3,58	6,6	2100	0,53	1,38
14	Протока к югу от о. Сасыл-Ары	126,3057	72,3110		320	3,51	4,6	920	0,82	1,35
15	Протока Матвей-Гёбюлетге	126,4440	72,4371	15.08	224	5,38	14,8	23,8	0,02	1,19
16	Арынская протока (исток)	126,2194	72,4859		435	3,27	10,4	1075	0,76	1,52
17	Бол. Туматская протока	126,2863	72,5193		509	6,41	9,2	865	0,27	1,03
18	Мал. Туматская протока	126,3748	72,5573		120	4,41	6,1	3,7	0,01	0,53
20	Бол. Туматская протока	126,4302	72,5742		368	6,60	8,50	902	0,40	1,15
21	Протока в направлении Василий-Уэся	126,4128	72,6161		75	4,74	8,00	20,0	0,06	0,91
22	Бол. Туматская протока	126,3475	72,7099		196	4,32	7,10	452	0,53	1,17
23	Протока к востоку от о. Кучча-Арыга	126,3063	72,7020		315	0,28	5,70	248	—	1,59
24	Протока, омывающая южную часть о. Самойловский	126,4644	72,3700	16.08	499	3,30	5,60	953	0,58	1,22

теплый сезон год начиная с 2012 г. (они не публикуются), тогда как реальные измерения Q не проводятся еще раньше — с 2003 г. [24]. В то же время, согласно [18, 19], КР для поста Кюсюр характеризуется хорошей многолетней устойчивостью. В итоге получилось, что с 10 по 16 августа 2022 г. Q на посту Кюсюр снизился примерно с 35200 до 28000 м³/с. Различие с данными ArcticGRO [25] составило 3–4,5 %.

В итоге на концевом участке Главного русла — на месте бывшего гидрометрического створа «4,7 км выше о. Столб» — измеренный 12 августа расход воды составил ~93–94,7 % расхода в Кюсюре (с учетом времени добегаания), тогда как, по данным работы [6], он должен быть 96,2 %. То есть объем оттока воды из Главного русла (между вершиной дельты и о. Столб) в левобережные протоки (включая протоку Булкурскую) и пойму оказался во время экспедиции выше. Это несоответствие подтверждают также данные по Булкурской протоке: по [6] ее доля $\leq 0,50$ %, а по измерениям 13 августа она составила 0,53 % (см. таблицу). Свидетельствует ли это об уменьшении роли Главного русла? С одной стороны, по данным промеров в Главном русле с 1982 по 2009 г., в гидростворе наблюдалось постепенное повышение отметок дна [1], способное снижать пропускную способность русла и расходы в нем [4]. С другой, по данным многолетних наблюдений на гидростворе «4,7 км выше о. Столб», обнаружен многолетний рост доли стока Главного русла с интенсивностью ~0,9 %/10 лет [6], который усилился после экстремально высокого половодья в 1989 г. ($Q_{\max} = 220$ тыс. м³/с). Можно лишь предположить, что единичные данные 2022 г. не могут служить надежным доказательством первой версии.

У о. Столб сток Главного русла распределяется между совместным входом в Оленёкскую и Туматскую протоки (на запад), Трофимовской (на север) и Быковской (на восток) протоками (см. рис. 1). Далее протока Оленёкская, ниже отделения от нее Туматской протоки, на протяжении 26 км принимает слева воды Лены, стекающие с поймы и через протоки, включая протоку Булкурскую. По измерениям 12 и 13 августа доли проток Быковской, Трофимовской, Туматской и Оленёкской (ниже впадения Булкурской) составили, в сравнении с водностью на посту Кюсюр, примерно 24,9–25,5, 58–59,2, 6 и 6,6 %. Разница с расчетными данными из [6] оказалась минимальной — менее 0,3 % (за исключением 3 % у протоки Трофимовской, сток которой получен по разности). То есть опубликованное в [6] распределение по-прежнему актуально!

Особая новизна работ в 2022 г. — в получении данных о рассредоточении стока в районе о. Самойловский и в системе Туматской протоки (см. рис. 1, таблицу). Согласно им, в питании Оленёкской протоки огромную роль играет протока, огибающая о. Сасыл-Ары с юго-востока (створ № 14). Доля Арынской протоки равна ~55 % Q в истоке Туматской протоки, а в [7] она равна 59 % (при расходе у Кюсюра 35000 м³/с). В конце маршрута в Большой Туматской протоке осталось ~24,2 % первоначального стока (створ № 22), тогда как в [1] для этого участка дается ~20 %, но при существенно больших Q в истоке Туматской протоки.

Режим скоростей течения воды функционально связан с расходами воды, морфологическим строением русла и уклонами водной поверхности, которые ближе к морю выполаживаются. Средние скорости течений варьировали во время измерений расходов воды от 0,20–0,60 до 0,92 м/с (в Главном русле), максимальные — от 0,50–1,50 до 2,96 м/с (см. таблицу). Наименьшие скорости — 0,01–0,06 м/с — измерены в Булкурской протоке, а также в нескольких небольших поперечных или почти осохших протоках.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ МУТНОСТИ РЕЧНЫХ ВОД И ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ

Изучение взвесей в речном потоке решало как геохимические, так и гидрологические задачи. Первая гидрологическая задача связана с оценкой вклада местных эрозионных и аккумулятивных процессов в трансформацию стока наносов Лены на его пути от вершины (ВД) к морскому краю дельты (МКД). Как известно, в устьях часть принесенных реками наносов осаждается [4, 26, 27]. Первый участок активной аккумуляции (в условиях гидравлического подпора) — это устьевой, включающий (в случае с устьем р. Лены) только дельту. Из этих наносов формируется и выдвигается в море тело дельты, образуются дно и берега дельтовых водотоков и водоемов, поверхность и рельеф дельтовой равнины, устьевые бары и др. Часть наносов в арктические дельты приносится речным льдом [2]. В [28] суммарные потери взвешенных наносов в дельте Лены оцениваются в 83–90 %, в [29] — в 70 %, в [6] — в 40–65 %. Активное накопление отложений в водотоках дельты Лены и на ее устьевом взморье требовало периодического дноуглубления с целью поддержания судоходных глубин [30].

Но не все придерживаются этой точки зрения. Так, по результатам сравнения карт, аэрофото- и спутниковых снимков, анализа морфологических изменений в восточной части дельты, частично по данным натурных измерений авторы публикации [31] делают вывод, что большая часть наносов не оседает в дельте, а достигает моря. Новое, более масштабное, сравнение карт и снимков не подтверждает и не опровергает этот вывод [32], свидетельствуя лишь о стабильности МКД. В работе [10] анализировались различия в значениях коэффициента отражения (на снимках Landsat за 2000–2019 гг.) для двух участков — в истоках и устьях главных рукавов. Обнаружено продольное увеличение этого коэффициента в Быковской и Сардахской протоках и его уменьшение в Оленёкской и Туматской. Основная причина — добавление в поток наносов от термоэрозии берегов, прежде всего южной экспозиции, относящихся к едоме, в теплую и солнечную погоду. Это согласуется с данными М.Н. Григорьева, оценившего массу наносов, поступающих в рукава с таких берегов (по 42 участкам общей протяженностью 76,6 км), в 2,15 млн т/год [3]. Но проблема спутниковых данных — это возможность фиксировать лишь взвеси в поверхностном слое потока. А это мелкие, неруслообразующие взвеси, по сути транзитные. Переход от них к общей величине взвесей и осредненной по сечению мутности, реальному русловому балансу наносов требует натурных измерений на разных глубинах и удалении от берега.

Материалы прежних натурных измерений мутности воды, проводившихся на спаде половодья и в меженно-паводочный сезон (при Q на посту Кюсюр <40000–30000 м³/с), показывают либо продольное уменьшение мутности воды [1, 2, 7, 33, 34], либо неоднозначную тенденцию, порой с увеличением мутности [1, 7, 20, 35, 36]. Можно лишь уверенно говорить, по данным многолетнего стационарного мониторинга и экспедиционных измерений, о значительном уменьшении мутности от ВД до о. Столб — в 1,5–2,5 раза.

Во время движения полевого отряда вверх по Быковской протоке (в ночь с 11 на 12 августа 2022 г.) измерения оптической мутности показали ее уменьшение от 7–11 (на участке «зал. Неёлова — примерно 50-й км от истока») до 2–3 NTU. Подобное для гидрометеорологических условий, наблюдавшихся во время экспедиции

2022 г., описано в [7, 10, 35]. Но при сравнении данных этого конкретного «прохода» вдоль Быковской протоки и спутникового снимка от 16 августа увеличения мутности на последнем не обнаружено, даже наоборот (см. ниже). Сама весовая мутность, измеренная в истоке Быковской протоки вечером 12 августа, составила 13–19 мг/л (поверхность). Мутность, измеренная у о-вов Столб и Самойловский, варьировала от 17 до 24 мг/л (поверхность). Это вполне соответствует гидрологическим условиям августа [2, 6] и подтверждает тезис о примерном равенстве мутности воды в основном рукаве и в истоках отделяющихся рукавов [4]. По длине Оленёкской протоки, к створу ниже впадения Булкурской протоки, мутность уменьшилась примерно в 1,5 раза (13 августа) — до 12 мг/л (поверхность). Тогда как в маловодной Булкурской протоке она составила 3,5 мг/л, а в полноводной протоке к югу от о. Сасыл-Ары — 32 мг/л. Различие хорошо видно и на спутниковом снимке. Незначимое снижение мутности отмечено по длине Туматской протоки (15 августа) — до 14–15 мг/л.

Натурные измерения были дополнены результатами дешифрирования снимка Landsat 8 от 16 августа 2022 г., с учетом построенной зависимости между относительными и абсолютными значениями мутности. Они свидетельствуют об уменьшении мутности воды между о-вами Тит-Ары и Столб — с 24,1 до 18,6 мг/л — и далее по Быковской протоке до 16,4 мг/л (в 120 км от о. Столб) (рис. 4, фрагмент А). Уменьшение обнаружено и в Туматской протоке — в 140 км от о. Столб мутность равна ~13,4 мг/л. Обратная ситуация наблюдается для Трофимовской-Сардахской протоки. Здесь мутность 16 августа продольно нарастает — до 34,8 мг/л, а также от правого к левому (южной экспозиции) берегу. За многолетний период (с 2000 г.) и на основе >50 ситуативных карт полей мутности воды, полученных по снимкам Landsat с 2000 г., Быковской протоке в июле-сентябре присущ обычно транзитный режим, а уменьшение поверхностной мутности есть только на выходе рукава в зал. Неёлова [10]. Для Оленёкской и Туматской проток уменьшение поверхностной мутности воды оценено в 5,5 и 13 %. Мутность воды в Трофимовской-Сардахской протоке увеличивается на 11,9 % к 130 км.

Выводы по натурным данным были проверены путем сравнения фактической мутности воды (S_{ϕ}) и мутности, отвечающей транспортирующей способности потока, — $S_{\text{тр}}$. Ее можно оценить по формуле К.И. Россинского и И.А. Кузьмина [37]:

$$S_{\text{тр}} = 0,024 \cdot V^3 / (hW), \quad (2)$$

где V — средняя скорость потока (м/с), h — глубина (м), W — гидравлическая крупность частиц (м/с), как функция от диаметра частиц и температуры воды (по В.Н. Гончарову). Средняя крупность отобранных во время экспедиции взвесей и прошедших гранулометрический анализ попадает в диапазон от 0,011 мм (пр. Быковская) до 0,014–0,019 мм. Это примерно в 2 раза меньше среднего диаметра наносов на посту Кюсюр при тех же Q (по сведениям из Гидрологических ежегодников). Температура воды была 15–16 °С, скорости течения и глубины приведены в таблице. В результате $S_{\phi} > S_{\text{тр}}$ (условия для осаждения наносов) обнаружены практически на всех створах, а $S_{\phi} < S_{\text{тр}}$ (условия для транзита и наращивания стока наносов) — лишь в истоках Быковской и Арынской проток.

Таким образом, для полноводных и глубоких дельтовых рукавов, с большими скоростями течения, сохраняющих большую часть водного стока до устья, как, например, Быковская и Сардахская протоки, мутность воды в июле-сентябре может не

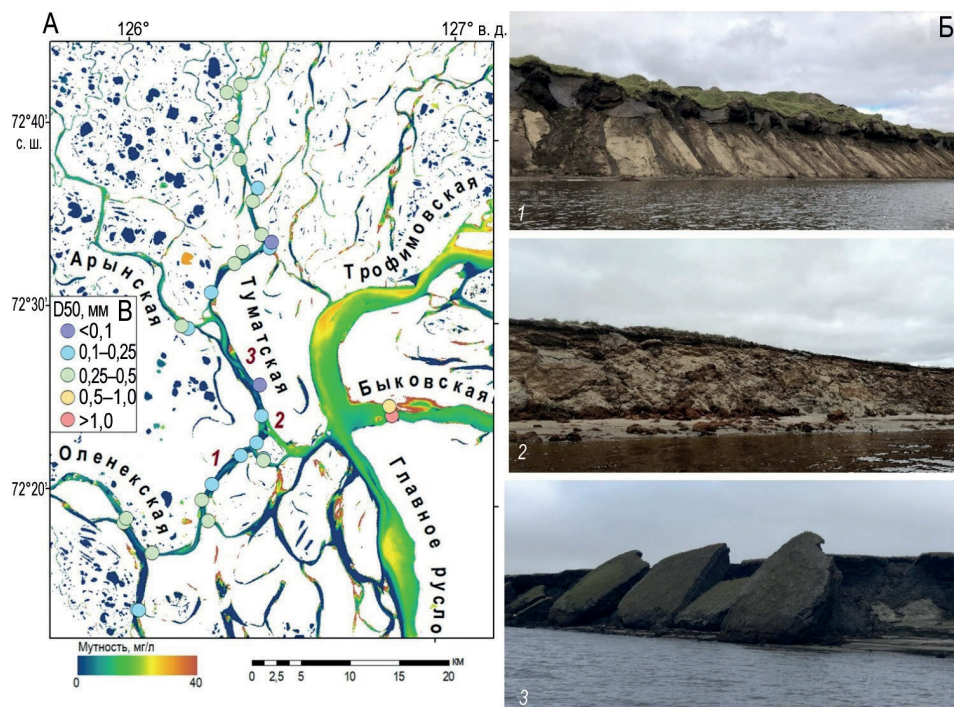


Рис. 4. Пространственное распределение мутности (Landsat 8, от 16.08.2022) (А) с примерами термоабразионных берегов (Б) и данными по средневзвешенной крупности донных наносов (В, легенда). Цифры на снимках (Б) соответствуют цифрам на карте (А)

Fig. 4. SSC spatial distribution (Landsat 8, 16.08.2022) (A) with the examples of thermal abrasion shore types (B) and average bottom sediment particle size (B). The numbers in the photo (B) correspond to the numbers on the map (A)

только не уменьшаться, но способна нарастать, прежде всего за счет поступления в поток продуктов размыва аллювиальных берегов и особенно едомных островов, а также на участках перекатов или на выходе с них. Это соответствует выводам из [10]. В конце Быковской протоки скорости течения могут уменьшаться вдвое-втрое [2], особенно на спаде половодья, что приводит к ситуации $S_{\phi} > S_{tr}$, например на перекате Дашка. По длине проток Оленёкская и Туматская, не говоря уже о более мелких рукавах, сменяются участки как уменьшения, так и увеличения S_{tr} (как по гидрологическим, так и по морфологическим причинам), что не способствует свободному транзиту наносов. Правобережные берега Оленёкской протоки — это едома с обрывами южной экспозиции. Поэтому осаждение речных взвесей здесь может компенсироваться (в летний сезон) поступлением наносов с берегов (см. рис. 3).

Во время экспедиции был определен вклад одного из ручьев, стекающего с термоэрозионного правобережного склона о. Курунгнах в системе Оленёкской протоки. Измеренная мутность воды соответствует гиперконцентрированным потокам (111 г/л), что формирует вынос взвеси в протоку величиной 6,8 т в сутки. При расчетных расходах наносов в Оленёкской протоке ~50–70 кг/с (или 4300–6050 т/сут.), согласно расчетам из [6] для наблюдавшихся во время экспедиции Q , поступление наносов с одного такого ручья увеличивает расход взвешенных наносов примерно на 0,11–0,16 %.

Учитывая, что подобные временные водотоки широко распространены в дельте, их вклад в продольное изменение стока наносов может быть существенен. Следует отметить, что аналогичные водотоки фиксировались в дельте Лены и ранее [8].

Вторая гидрологическая задача связана с раскрытием характера распределения взвесей и мутности по глубине и ширине потока с целью дешифрирования эхограмм АДПТ, а также определения соотношения между приповерхностной (видимой со спутников, измеряемой с катера и т. п.) и средней мутностью потока — для целей более точного расчета расходов наносов в створах и расширения возможностей использования спутниковых снимков. Последний раз предметно эти соотношения изучались в 1950-х гг. [8]. В Булкурской протоке мутность в приповерхностном и придонном слое составила 3,55 и 5,2 мг/л, в Оленёкской — 11,7 и 13,5 мг/л, Туматской — 16,6 и 32,7 мг/л, Арынской — 14,3 и 17,8 мг/л, в Главном русле — 18,2 и 25,9 мг/л (см. рис. 4). Рассчитанные по эхограммам АДПТ мутности, визуализированные на поперечниках в виде изолиний (см. рис. 3), в большинстве случаев совпали с S_{ϕ} на срединной вертикали, что свидетельствует о надежности этого метода.

Также обнаружено, что с нарастанием ветро-волновой активности мутность сильно увеличивается. Так, 11 августа S_{ϕ} у о. Самойловский составляла 24,3 мг/л, 14 августа (штормовой день) — 32,1 мг/л, 15 августа — 14,2 мг/л. Это типичное событие не только при сильном ветре, но и при слабых ветрах — в широких рукавах и на отмелях, которое идентифицируется на спутниковых снимках зоной повышенной мутности и может привести к неверной трактовке данных спутниковой съемки.

Рассчитанные в ПК ASET расходы взвешенных наносов, если сравнивать их с расходами наносов, которые должны быть по имеющейся связи расходов наносов в рукавах с расходами воды на посту Кюсюр [6], за исключением Булкурской и Туматской протоки, оказались меньше в 2–2,5 раза. Кроме того, баланс наносов, по данным ПК ASET, редко соблюдается — даже в узлах разветвления. То есть этот метод расчета требует дальнейшего совершенствования.

ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Источником донных отложений в русловой сети речных дельт служат взвешенные и влекомые наносы главной реки, поступающие в дельту, а также продукты размыва и переложения коренных и аллювиально-дельтовых отложений в пределах самой дельты, вынос (реками и ручьями) наносов с местного водосбора дельт. Крупность донных отложений и ее изменения по длине русла могут свидетельствовать о гидролого-морфометрических характеристиках потока, прежде всего во время «высокой воды», о его транспортирующей способности и характере эрозионно-аккумулятивных процессов, о роли боковых источников поступления наносов в русло.

Средневзвешенный диаметр 30 проб донных грунтов составил 0,46 мм, что отвечает средней и крупной фракции песка. Максимальная крупность донных отложений отмечена в Быковской протоке и у правого берега (5,58 мм) (см. рис. 4, фрагмент А). Здесь дно русла выстлано галечно-валунными отложениями местного генезиса. По мере удаления от коренного берега в Туматской, Оленёкской и Булкурской протоках донные отложения представлены исключительно песчаными фракциями. Значения средневзвешенной крупности меняются в интервале от 0,1–1 мм. Наиболее тонкие отложения обнаружены в малых поперечных протоках (до 0,088 мм). Во всех пробах, взятых в основных рукавах, доля алевритовых (0,05–0,1 мм) и илистых

(<0,05 мм) фракций не превышала 8 %, в среднем составляя 2,7 %. По длине Туматской и Оленёкской проток (на участках измерений) сменялись участки чередования дна, выложенного мелкими (0,1–0,25 мм) и среднезернистыми (0,25–0,5 мм) песками, что подтверждает тезис о чередовании участков русел с $S_{\phi} > S_{\text{тр}}$ и $S_{\phi} < S_{\text{тр}}$. Тогда как крупный размер наносов в истоке Быковской протоки говорит о свободном транзите взвесей во время межени.

Из похожих работ известна лишь одна [5]. Согласно ей, средний диаметр отложений в Оленёкской протоке уменьшается вниз по течению от 0,17–0,26 мм до 0,07–0,10 мм (на устьевом баре); сортированность наносов хорошая. В Быковской протоке перекаты сложены крупнозернистыми песками; галька и гравий встречаются вдоль правого берега и на перекатах; остальное слагают средние и мелкие пески, особенно на перекате Дашка. Можно говорить, что материалы экспедиций 1979–1981 и 2022 гг. совпадают.

Результаты обработки грунтов на едомных берегах показали их преимущественно минеральное происхождение. При этом сами грунты представляют собой песчано-илистую смесь с включениями остатков растительности. Они не очень влагонасыщенные: доли сухого вещества в них — от 83,6 до 92,2 %. Эрозия и термоэрозия таких грунтов приводят к поступлению в речной поток относительно мелких частиц, которые по своим размерам соответствуют взвешенным частицам. Еще одно доказательство этого — результаты изучения конуса выноса оврага, расположенного в разрушаемой части едомы правого берега Оленёкской протоки (72,33° с. ш.; 126,28° в. д.). Они показали, что доля частиц с размерами <0,1 мкм достигала 40 %.

ВЫВОДЫ

По итогам проводившейся с 10 по 16 августа 2022 г. в дельте реки Лены комплексной гидрологической экспедиции установлено, что распределение водного стока у о. Столб соответствует ранее рассчитанному авторами (в 2016 г.): в Быковскую, Трофимовскую, Туматскую и Оленёкскую протоки поступает 24,9–25,5, 58–59,2, 6 и 6,6 % стока р. Лены на посту Кюсюр. В то же время доля Главного русла оказалась несколько ниже расчетной. Получены новые данные по рассредоточению стока в районе о. Самойловский, в узле впадения Булкурской протоки в Оленёкскую и в южной части системы Туматской протоки, а также о распределении скоростей течения в поперечных створах.

В дальнейшем увязка расходов воды в рукавах дельты с расходами воды р. Лены и шириной рукавов ($Q_{\text{рук.}} = f(Q_{\text{Кюсюр}}, B_{\text{рук.}})$) в контексте гидролого-морфологических зависимостей и гидрографических порядков может создать хороший и простой инструмент для расчета расходов воды в не охваченных измерениями рукавах дельты Лены.

Измерения расходов и мутности воды пришлось на меженно-паводочный сезон, поэтому измеренная в поверхностном слое мутность воды была сравнительно небольшой — 12–24 мг/л, с минимумом в Булкурской протоке (3,6 мг/л) и максимумом в активной протоке к югу от о. Сасыл-Ары (32,1 мг/л). По глубине мутность возрастала в 1,2–2 раз. То есть одних спутниковых снимков явно недостаточно для оценки переноса речных взвесей в дельте Лены, особенно руслообразующих. По длине Оленёкской и Туматской проток мутность снижалась (в 1,5 и 1,1 раз), что закономерно из-за превышения фактической мутности над транспортирующей мутностью. Вдоль Быковской протоки мутность, наоборот, нарастала, правда на спутниковом снимке этого не обнаружено.

Мощным дополнительным источником наносов служат размываемые и термоэродируемые берега, особенно по длине Быковской и Оленёкской протоки, в солнечную и теплую погоду. Разрушение таких берегов приводит к поступлению в поток частиц, по своим размерам соответствующих взвешенным частицам. Средняя крупность взвесей составила (в гидрологических условиях проведения экспедиции) 0,011–0,019 мм. В узлах разветвления мутность в главном и отходящих рукавах в целом одинаковая. Построены зависимости между весовой и оптической мутностью, а также с величинами обратного рассеяния.

Средневзвешенный диаметр 30 проб донных грунтов составил 0,46 мм, что соответствует средней и крупной фракции песка. Максимальная крупность донных отложений отмечена в Быковской протоке; наиболее тонкие отложения обнаружены в малых поперечных протоках. По длине Туматской и Оленёкской протоки сменяются участки чередования дна, выложенного мелкими и среднезернистыми песками.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работы выполнены в рамках гранта РФФИ № 21-17-00181.

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The work was carried out within the framework of the RSF grant No. 21-17-00181.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаинов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г.* Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: ААНИИ, 2013. 268 с.
2. *Гуков А.Ю.* Гидробиология устьевой области реки Лены. М.: Научный мир, 2001. 288 с.
3. *Григорьев М.Н.* Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Якутск, 2008. 38 с.
4. *Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В.* Основы гидрологии устьев рек: Учебное пособие. М.: Триумф, 2018. 316 с.
5. Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития. М.: ГЕОС, 2007. 445 с.
6. *Magritsky D.V., Alexeevsky N.I., Aybulatov D.N., Fofonova V.V., Gorelkin A.* Features and evaluations of spatial and temporal changes of water runoff, sediment yield and heat flux in the Lena River delta // *Polarforschung*. 2018. № 87 (2). P. 89–110.
7. *Коротяев В.Н., Михайлов В.Н., Бабич Д.Б., Богомолов А.Л., Заец Г.М.* Гидролого-морфологические процессы в дельте р. Лены // *Земельные и водные ресурсы. Противозерозионная защита и регулирование русел*. М.: Изд-во МГУ, 1990. С. 120–144.
8. *Тасаков П.Д.* Сток взвешенных наносов в устье р. Лены // *Труды ГГИ*. 1965. Вып. 124. С. 125–138.
9. *Федорова И.В., Большаинов Д.Ю., Макаров А.С., Третьяков М.В., Четверова А.А. и др.* Современное гидрологическое состояние дельты р. Лены // *Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики*. М.: Изд-во МГУ, 2009. С. 278–291.
10. *Чалов С.Р., Прокотьева К.Н.* Оценка баланса взвешенных наносов в дельте р. Лены по данным дистанционного зондирования Земли // *Исследование Земли из космоса*. 2021. № 3. С. 19–29.
11. *Ivanov V.V., Piskun A.A.* Distribution of river water and suspended sediments in the river deltas of the Laptev Sea // *Berichte zur Polarforschung*. 1995. № 176. P. 142–153.
12. *Fedorova I., Chetverova A., Bolshiyaynov D., Makarov A., Boike J., Heim B., Morgenstern A., Overduin P.P., Wegner C., Kashina V., Eulenburg A., Dobrotina E., Sidorina I.* Lena Delta hydrology

and geochemistry: long-term hydrological data and recent field observations // *Biogeosciences*. 2015. № 12. P. 345–363.

13. *Magritsky D.V., Mikhailov V.N., Aybulatov D.N., Fofonova V.V., Bolshiyarov D.Yu.* Geographical profile of the Lena Delta area and a history of hydrologic investigation of the Lena River lower reach and delta // *Polarforschung*. 2018. № 87 (2). P. 81–88.

14. Руководящий документ РД 52.08.767-2012. Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами «Stream Pro» и «Rio Grande». М., 2012. 80 с.

15. *Морейдо В.М., Чалов С.Р., Иванов В.А., Крастьнь Е.А.* Применение доплеровских измерителей течений для оценки стока наносов // *Маккаевские чтения* — 2020. М., 2021. С. 35–45.

16. *Dominguez Ruben L.G., Szupiany R.N., Latosinski F.G., Lopez W.C., Wood M., Boldt J.* Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET): A software package for calibrating and processing TRDI ADCP data to compute suspended-sediment transport in sandy rivers // *Computers and Geosciences*. 2018. V. 140. P. 10449.

17. Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 26.02.2023).

18. *Магрицкий Д.В.* Естественные и антропогенные изменения гидрологического режима низовьев и устьев крупнейших рек Восточной Сибири: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2001. 25 с.

19. *Иванов В.В., Пискун А.А., Корабель Р.А.* Распределение стока по основным рукавам дельты Лены // *Труды ААНИИ*. 1983. Т. 378. С. 59–71.

20. *Федорова И.В., Четверова А.А., Алексеева Н.К., Скороспехова Т.В., Романов С.Г., Большианов Д.Ю., Шадрин А.А., Макушин М.А.* Гидрологические и гидрохимические исследования в дельте р. Лены весной 2015 и 2016 гг. // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2017. № 3 (113). С. 107–114.

21. *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 природные ресурсы*. 2014. № 1. С. 91–99.

22. *Антипова Е.А., Крылова А.И., Перевозкин Д.В.* Численное моделирование неустановившегося движения речного потока дельты р. Лены // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2017. Т. 4. № 1. С. 131–135.

23. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения: 16.01.2023).

24. *Третьяков М.В., Муждаба О.В., Пискун А.А., Терехова Р.А.* Состояние гидрологической сети наблюдений Росгидромета в устьевых областях рек АЗРФ // *Водные ресурсы*. 2022. Т. 49. № 5. С. 583–595.

25. Обсерватория «Великие арктические реки» (ArcticGRO). URL: <https://arcticgreativers.org/data> (дата обращения: 16.01.2023).

26. *Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 203 с.

27. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.

28. *Alabyan A.M., Chalov R.S., Korotaev V.N., Sidorchuk A.Yu., Zaitsev A.A.* Natural and technogenic water and sediment supply to the Laptev sea // *Berichte zur Polarforschung*. 1995. № 176. P. 265–271.

29. *Коротаев В.Н.* Геоморфология речных дельт. М.: Изд-во МГУ, 1991. 224 с.

30. *Водные пути бассейна Лены*. М.: МИКИС, 1995. 600 с.

31. *Rachold V., Grigoriev M., Are F., Solomon S., Reimnitz E., Kassens H., Antonow M.* Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic Shelf seas // *Int. J. Earth Sci.* 2000. V. 89. P. 450–460.

32. *Кравцова В.И., Инюшин А.Н.* Исследование современной динамики дельты Лены по космическим снимкам // *Водные ресурсы*. 2019. Т. 46. № 6. С. 567–574.

33. *Rachold V., Hermel J., Korotaev V.* Expedition to the Lena River July/August 1994 // *Berichte zur Polarforschung*. 1995. № 182. P. 185–191.
34. *Rachold V., Hoops E., Alabyan A., Korotaev V., Zaitsev A.* Expedition to the Lena and Yana Rivers June-September 1995 // *Berichte zur Polarforschung*. 1997. № 248. P. 197–204.
35. *Чаркин А.Н., Федорова И.В., Семилетов И.П., Четверова А.А., Густафссон О.* Масштабы пространственной изменчивости распределения взвеси в системе «Река Лена — Море Лаптевых» // *Геология, география и экология океана*. Ростов-на-Дону: ЮИЦ, 2009. С. 351–354.
36. *Ogneva O., Mollenhauer G., Juhls B., Sanders T., Palmtag J., Fuchs M., Grotheer H., Mann P.J., Strauss J.* Particulate organic matter in the Lena River and its Delta: From the permafrost catchment to the Arctic Ocean // *Biogeosciences*. 2023. V. 20. Issue 7. P. 1423–1441.
37. *Россинский К.И., Кузьмин И.А.* Балансовый метод расчета деформаций дна потока // *Труды Гидропроекта*. 1964. № 12. С. 265–271.

REFERENCES

1. *Bol'shiyanov D.Iu., Makarov A.S., Shnaider V., Shtof G.* *Proiskhozhdenie i razvitie del'ty reki Leny*. Origin and development of the Lena river delta. St. Petersburg: *AANII*, 2013: 268 p. [In Russian].
2. *Gukov A.Iu.* *Gidrobiologiya ust'evoy oblasti reki Leny*. Lena River delta hydrobiology. Moscow: *Nauchnyi mir*, 2001: 288 p. [In Russian].
3. *Grigor'ev M.N.* *Kriomorfogenez i litodinamika pribrezhno-shel'fovoj zony morej Vostochnoj Sibiri*. Eastern Siberian seas coastal shelf zone cryomorphogenesis and lithodynamics. PhD thesis. Yakutsk, 2008: 38 p. [In Russian].
4. *Mikhailov V.N., Mikhailova M.V., Magritskii D.V.* *Osnovy gidrologii ust'ev rek*. Basics of river mouth hydrology. Moscow: *Triumph*, 2018: 316 p. [In Russian].
5. *Estuarno-del'tovye sistemy Rossii i Kitaya: gidrologo-morfologicheskie processy, geomorfologiya i prognoz razvitiya*. Estuary-deltaic systems of Russia and China: hydrological and morphological processes, geomorphology and development forecast. Moscow: *GEOS*, 2007: 445 p. [In Russian].
6. *Magritskiy D.V., Alexeevskiy N.I., Aybulatov D.N., Fofonova V.V., Gorelkin A.* Features and evaluations of spatial and temporal changes of water runoff, sediment yield and heat flux in the Lena River delta. *Polarforschung*. 2018, 87 (2): 89–110.
7. *Korotaev V.N., Mikhailov V.N., Babich D.B., Bogomolov A.L., Zaets G.M.* Hydrological and morphological processes in the Lena river delta. *Zemel'nye i vodnye resursy. Protivoerozionnaya zashchita i regulirovanie rusel*. Land and water resources. Moscow: *Izdatelstvo MGU*, 1990: 120–144. [In Russian].
8. *Tasakov P.D.* Suspended sediment flux in the Lena river delta. *Trudy GGI*. Proceedings of the Hydrological Institute. 1965, 124: 125–138. [In Russian].
9. *Fedorova I.V., Bol'shiyanov D.Iu., Makarov A.S., Tretyakov M.V., Chetverova A.A.* Modern hydrological condition of Lena river delta. *Sistema moria Laptevskh i prilagaiushchikh morei Arktiki*. Laptevych sea system. Moscow: *Izdatelstvo MGU*, 2009: 278–291. [In Russian].
10. *Chalov S.R., Prokop'eva K.N.* Suspended sediment budget estimation in the Lena river delta based on remote sensing data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. Earth study from space. 2021, 3: 19–29. [In Russian].
11. *Ivanov V.V., Piskun A.A.* Distribution of river water and suspended sediments in the river deltas of the Laptev Sea. *Berichte zur Polarforschung*. 1995, 176: 142–153.
12. *Fedorova I., Chetverova A., Bolshiyarov D., Makarov A., Boike J., Heim B., Morgenstern A., Overduin P.P., Wegner C., Kashina V., Eulenburg A., Dobrotina E., Sidorina I.* Lena Delta hydrology and geochemistry: long-term hydrological data and recent field observations. *Biogeosciences*. 2015, 12: 345–363.

13. *Magritsky D.V., Mikhailov V.N., Aybulatov D.N., Fofonova V.V., Bolshiyakov D.Yu.* Geographical profile of the Lena delta area and a history of hydrologic investigation of the Lena river lower reach and delta. *Polarforschung*. 2018, 87 (2): 81–88.
14. *Rukovodiashchii dokument RD 52.08.767-2012. Raskhod vody na vodotokakh. Metodika izmereni akusticheskimi doplerovskimi profilografami «Stream Pro» i «Rio Grande».* Guidance document 52.08.767-2012. Water discharge on the water streams. Methods based on ADCP «Stream Pro» and «Rio Grande». Moscow, 2012: 80 p. [In Russian].
15. *Moreido V.M., Chalov S.R., Ivanov V.A., Krastyn' E.A.* ADCP application for sediment flux estimation. *Makkaveevskie chteniia. Maccabean readings — 2020*. Moscow, 2021: 35–45. [In Russian].
16. *Dominguez Ruben L.G., Szupiany R.N., Latosinski F.G., Lopez W.C., Wood M., Boldt J.* Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET): A software package for calibrating and processing TRDI ADCP data to compute suspended-sediment transport in sandy rivers. *Computers and Geosciences*. 2018, 140: 10449.
17. *Pogoda i klimat.* Weather and climate. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (accessed 26.02.2023).
18. *Magritskii D.V.* *Estestvennye i antropogennye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima nizov'ev i ust'ev krupnejshih rek Vostochnoj Sibiri.* Natural and anthropogenic changes in the hydrological regime of the lower reaches and mouths of the largest rivers of Eastern Siberia. PhD thesis. Moscow, 2001: 25 p. [In Russian].
19. *Ivanov V.V., Piskun A.A., Korabel' R.A.* Runoff distribution along the main branches of the Lena Delta. *Trudy AANII. AARI Proceedings*. 1983, 378: 59–71. [In Russian].
20. *Fedorova I.V., Chetverova A.A., Alekseeva N.K., Skorospekhova T.V., Romanov S.G., Bol'shiianov D.Iu., Shadrina A.A., Makushin M.A.* Hydrological and hydrochemical studies in the delta of the Lena River in the spring of 2015 and 2016. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research*. 2017, 3 (113): 107–114. [In Russian].
21. *Alekseevskii N.I., Aibulatov D.N., Kuksina L.V., Chetverova A.A.* The structure of the watercourses in the Lena Delta and its influence on the processes of river flow transformation. *Geografija i prirodnye resursy. Geography and natural resources*. 2014, 1: 91–99. [In Russian].
22. *Antipova E.A., Krylova A.I., Perevozkin D.V.* Numerical modeling of the unsteady movement of the river flow of the Lena river delta. *Interekspo Geo-Sibir'*. 2017, 4 (1): 131–135. [In Russian].
23. *Informatsionnaia sistema po vodnym resursam i vodnomu khoziaistvu basseinov rek Rossii.* Information system on water resources and water management of Russian river basins. Available at: <http://gis.vodinfo.ru/> (accessed 16.01.2023).
24. *Tret'iakov M.V., Muzhdaba O.V., Piskun A.A., Terekhova R.A.* State of the hydrological observation network of Roshydromet in the mouth areas of the Russian Arctic Rivers. *Vodnye resursy. Water resources*. 2022, 49 (5): 583–595. [In Russian].
25. Arctic Great Rivers Observatory. Available at: <https://arcticgreatrivers.org/data> (accessed 16.01.2023).
26. *Alekseevskii N.I.* *Formirovanie i dvizhenie rechnyh nanosov.* Formation and movement of river sediments. Moscow: *Izdatelstvo MGU*, 1998: 203 p. [In Russian].
27. *Lisitsin A.P.* Marginal filters of the oceans. *Okeanologiya. Oceanology*. 1994, 34 (5): 735–747. [In Russian].
28. *Alabyan A.M., Chalov R.S., Korotaev V.N., Sidorchuk A.Yu., Zaitsev A.A.* Natural and technogenic water and sediment supply to the Laptev sea. *Berichte zur Polarforschung*. 1995, 176: 265–271.
29. *Korotaev V.N.* *Geomorfologiya rechnyh del't.* Geomorphology of river deltas. Moscow: *Izdatelstvo MGU*, 1991: 224 p. [In Russian].

30. *Vodnye puti basseina Leny*. Waterways of Lena river basin. Moscow: MIKIS, 1995: 600 p. [In Russian].
31. *Rachold V., Grigoriev M., Are F., Solomon S., Reimnitz E., Kassens H., Antonow M.* Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic Shelf seas. *Int. J. Earth Sci.* 2000, 89: 450–460.
32. *Kravtsova V.I., Iniushin A.N.* Study of the modern dynamics of the Lena delta based on satellite images. *Vodnye resursy*. Water resources. 2019, 46 (6): 567–574. [In Russian].
33. *Rachold V., Hermel J., Korotaev V.* Expedition to the Lena River July/August 1994. *Berichte zur Polarforschung*. 1995, 182: 185–191.
34. *Rachold V., Hoops E., Alabyan A., Korotaev V., Zaitsev A.* Expedition to the Lena and Yana Rivers June-September 1995. *Berichte zur Polarforschung*. 1997, 248: 197–204.
35. *Charkin A.N., Fedorova I.V., Semiletov I.P., Chetverova A.A., Gustaffson O.* Scales of spatial variability of suspended matter distribution in the “Lena River — Laptev Sea” system. *Geologiya, geografiia i ekologiya okeana*. Geology, geography and ecology of the ocean. Rostov-on-Don: YUNTS, 2009: 351–354. [In Russian].
36. *Ogneva O., Mollenhauer G., Juhls B., Sanders T., Palmtag J., Fuchs M., Grotheer H., Mann P. J., Strauss J.* Particulate organic matter in the Lena River and its Delta: From the permafrost catchment to the Arctic Ocean. *Biogeosciences*. 2023, 20 (7): 1423–1441.
37. *Rossinskii K.I., Kuz'min I.A.* Bottom deformations calculations: the budget method. *Trudy Gidroproekta*. Proceedings of Hydroproject. 1964, 12: 265–271. [In Russian].