

УДК [556.535.6+556.113.3]:556.54(282.256.67)

АНАЛИЗ ПРИЧИН УВЕЛИЧЕНИЯ МУТНОСТИ ВОДЫ В ДЕЛЬТЕ р. ЛЕНЫ¹

© 2025 г. К. Н. Прокопьева^{а,*}, С. Р. Чалов^{б,**}

^аИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^бМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

*e-mail: prokris3@mail.ru

**e-mail: hydroserg@mail.ru

Поступила в редакцию 14.06.2024 г.

После доработки 06.10.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Обсуждены причины увеличения мутности воды по длине рукавов дельты р. Лены. На основе спутниковых снимков Landsat 5–9 с 2000 по 2022 г., полученных на даты, когда расходы воды в замыкающем створе р. Лены меняются от 17400 до 78100 м³/с (период открытого русла с июня по сентябрь), смоделированы распределения мутности воды по акватории дельты. Реанализ ERA5-Land, мониторинговые наблюдения на научно-исследовательской станции “остров Самойловский” и данные ДЗЗ использованы для оценки факторов изменений мутности воды: температуры воздуха, количества осадков, скорости ветра, потока солнечной радиации, температуры многолетнемерзлых пород; расходов и мутности воды в вершине дельты; интенсивности отступления берегов. Методами корреляционного анализа установлено, что возрастание мутности в рукавах дельты обусловлено совокупностью метеорологических факторов (температуры, осадков, ветра, радиации) и интенсивности разрушения берегов. Продольное увеличение мутности (в среднем за исследуемый период на 2–4% по длине дельты) объяснено возрастанием среднесуточной температуры воздуха и температуры мерзлоты. Преимущественное влияние температурных факторов установлено для участков проток, берега которых сложены ледовым комплексом, где выявлены статистически достоверные зависимости мутности воды от интенсивности разрушения берегов.

Ключевые слова: сток взвешенных наносов, спутниковые снимки, мерзлота, русловые процессы, Landsat, термоэрозия, Арктика.

DOI: 10.31857/S0321059625020037 **EDN:** UCSZQW

ВВЕДЕНИЕ

В дельтах воздействие противоположно направленных потоков вещества и энергии (с одной стороны, связанные с речными факторами, а с другой — с морскими) определяет изменение стока наносов. В крупнейшей арктической дельте р. Лены эти процессы осложнены климатически обусловленным разрушением многолетнемерзлых пород, которые деградируют в результате увеличения температуры воздуха в арктических широтах [5].

На сегодняшний день для этого региона доступны лишь эпизодические данные о мутности

воды и стоке наносов, основанные на экспедиционных исследованиях, которые проводились здесь с середины XX в. учеными ААНИИ, МГУ, Тиксинской ЦГМС, ГГИ и СПбГУ, а также в рамках Российско-Германских экспедиций [1, 2, 4, 6, 7, 9–14, 21, 22]. Результаты работ иллюстрировали лишь отдельные ситуации изменения мутности воды и приводили к противоположным выводам.

Первые систематические оценки стока взвешенных наносов были сделаны на основе применения методик обработки спутниковых снимков и выявили тенденцию к продольному увеличению мутности воды [16, 17, 20]. Данная особенность преимущественно характеризует участки Трофимовской и Оленекской протоков. Причины и факторы продольного увеличения мутности в дельте Лены ранее описаны не были. Предполагалось, что они могут быть связаны с синоптиче-

¹ Обработка данных реанализа и материалов полевых исследований выполнена при финансовой поддержке Русского географического общества (проект 02/2024-И). Адаптация региональной модели мутности воды и дешифрирование спутниковых снимков — по ГЗ № 121051100166-4 научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ им. М.В. Ломоносова.

скими факторами, термоэрозионными процессами, влиянием водности [9, 18].

В данной статье рассматриваются возможные факторы изменения стока взвешенных наносов в дельте Лены: 1) метеорологические и синоптические; 2) гидрологические; 3) русловые. Задачи статьи, таким образом, следующие: 1) создание базы данных по факторам и характеристикам распределения мутности воды по рукавам дельты Лены; 2) на основе различных ситуаций распределения мутности анализ влияния на мутность воды в рукавах дельты температуры воздуха, осадков, ветра, солнечной радиации, температуры многолетнемерзлых пород; 3) анализ влияния расходов и мутности воды в вершине дельты; 4) изучение вклада интенсивности отступления берегов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дельта р. Лены — крупнейшая по площади и числу рукавов в России и Арктике. Площадь дельты, по разным оценкам, достигает 32 тыс. км². Четыре основных направления стока — рукава — Быковская, Трофимовская, Туматская и Оленекская протоки; они и 6000 малых протоков образуют обширную дельту выполнения, которая выдвигается в море Лаптевых и простирается на 190 км с юга на север и на 250 км с запада на восток.

Вершиной дельты в работе принимается первый узел разветвления — о. Тит-Ары, который разделяет реку на два рукава: главное русло и Булкурскую протоку. У о. Столб река разбивается на четыре основных рукава: Быковскую, Трофимовскую, Оленёкскую и Туматскую протоки, образующие одноименные сектора дельты. Здесь основной сток резко поворачивает к северо-востоку и переходит в рук. Трофимовская протока, длина которой составляет 142 км от о. Столб. В этой части дельты расположен крупнейший ледовый комплекс — о. Собо-Сисе.

У о. Столб сток резко поворачивает и к юго-востоку по Быковской протоке, принимая практически обратное направление стоку реки выше о. Столб. Здесь формируется Быковская протока длиной 103 км от о. Столб до

мыса Быкова. Сектор Быковской протоки характеризуется меньшей площадью островов и количеством протоков. Разветвления здесь начинают формироваться при выходе в приморскую часть. Острова и протоки приурочены к обширной мелководной левобережной части, правый берег представлен выходами коренных пород Хараулахского хребта.

Центральный сектор дельты — сеть Туматских протоков, берет свое начало от о. Самойловского. Русло в этой части дельты более узкое и неглубокое, разбивается на многочисленные протоки.

Западная часть дельты представлена самым длинным рукавом дельты — Оленекской протокой, которая берет начало у о. Столб и протекает на 210 км до устьевых бара. Правый берег в основном представлен выходами ледового комплекса на островах Курунгнах, Харданг-Сисе; левый берег — коренными породами кряжа Чекановского.

Сток воды в течение года распределяется очень неравномерно. В фазу повышенной водности проходит 60–90% годового стока воды и 75–95% годового стока взвешенных наносов. Сток взвешенных веществ по главным рукавам дельты распределяется пропорционально стоку воды [8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки концентрации взвешенных наносов в работе применены спутниковые алгоритмы по снимкам Landsat. Всего в работе использовано 75 спутниковых снимков Landsat 5, 7, 8 и 9 за период с 2000 по 2022 г., полученных на периоды открытого русла (с июня по сентябрь), когда расходы воды в вершине дельты составляли от 17 400 до 78 100 м³/с. Однако максимальные расходы воды в дельте могут достигать 220 000 м³/с. Прохождение половодья и затопление поймы происходят в ледовых условиях, поэтому снимки, приходящиеся на период повышенного стока, не учитывались в исследовании ввиду скопления льда в русле и отсутствия чистой водной поверхности, необходимой для анализа. Полученная величина характеризует условия летнего половодья и летне-осенней межени, на которые

приходится 60–90% годового стока и 75–95% годового стока взвешенных наносов р. Лена.

Моделирование мутности воды проводилось на основе методики, подробно описанной в работе [18]. К каждому спутниковому снимку применялось уравнение зависимости между коэффициентом отражения ρ пикселя снимка в красном спектре и концентрации взвешенных наносов SSC (мг/л). Таким образом, коэффициент отражения ρ каждого пикселя спутникового снимка, попадающего на водную поверхность, автоматически (с помощью программного кода в Google Earth Engine) коэффициент пересчитывался в SSC с использованием уравнения, полученного авторами статьи на основе полевых данных, собранных в дельте Лены в 2022 г. [9, 16]:

$$SSC = 1512.1\rho - 25.0. \quad (1)$$

Концентрации взвешенных наносов в магистральных рукавах рассчитывались по значениям, осредненным для полигонов, расположенных в соответствующих частях дельты: 1) в вершине дельты; в протоках: 2) Быковской; 3) Трофимовской; 4) Туматской; 5) Оленекской (рис. 1). Участки расчета выделены в пределах дельтовой области на отдалении от морского края с целью минимизировать влияние сгонно-нагонных явлений со стороны моря.

Для расчета расходов взвешенных наносов использованы результаты обработки данных акустического доплеровского профилографа течений. Эмпирическая зависимость вертикального распределения мутности воды позволяет перейти от поверхностной мутности $SSC_{\text{пов}}$ к средней мутности $SSC_{\text{ср}}$ по вертикали [3]:

$$SSC_{\text{ср}} = 1.02SSC_{\text{пов}} - 13.9. \quad (2)$$

Расход взвешенных наносов R (кг/с) (3) вычислялся как произведение средней мутности по вертикали $SSC_{\text{ср}}$ (мг/л) и расхода воды на участке Q (м³/с):

$$R = SSC_{\text{ср}} \times Q. \quad (3)$$

Расходы воды на участках расчета средней мутности брались в соответствии с изменчивостью распределения стока воды по рукавам в зависимости от расхода воды в вершине дельты, согласно данным, приведенным в работах [8, 9].

Расход воды Q в вершине дельты рассчитывался на основе данных в замыкающем створе р. Лены (г/п Кюсюр) с учетом времени добегания 2 дня.

Далее проводился расчет относительного изменения мутности воды ΔS (%) на участке “вершина дельты – магистральный рукав” по формуле:

$$\Delta S = \frac{(SSC_{\text{МР}} - SSC_{\text{ВД}})}{SSC_{\text{ВД}}}, \quad (4)$$

где ΔS – относительное изменение мутности воды (%), $SSC_{\text{МР}}$ – мутность воды в магистральном рукаве (мг/л), $SSC_{\text{ВД}}$ – мутность воды в вершине дельты (мг/л).

Отдельно рассматриваются ситуации положительных ($\Delta S > 0$ – мутность воды продольно увеличивается) и отрицательных ($\Delta S < 0$ – продольно уменьшается) изменений концентраций взвешенных веществ.

Для оценки метеорологических факторов использованы данные реанализа ERA5-Land. В работе задействованы следующие данные: 1) средняя температура воздуха на высоте 2 м от водной поверхности или суши (°C); 2) сумма осадков (мм); 3) суммарный поток солнечной радиации (Вт/м²); 4) средняя скорость ветра (м/с), – рассчитывались как среднее для анализируемых участков, аналогичных расчетам концентрации взвешенных веществ (рис. 1). Также привлекались данные о температуре многолетнемерзлых пород на поверхности и на глубине 0.75 м по станции о. Самойловский [15]. Помимо метеорологических величин, рассчитанных на дату получения снимка, в работе анализировались их суммы и средние за 3, 5 и 7 сут, предшествующих дате снимка, по которому проводился расчет изменения мутности воды.

Оценка интенсивности разрушений берегов установлена по дешифрированию спутниковых снимков за период с 2000 по 2021 г. Расчеты проводились с использованием серии спутниковых снимков Landsat 7 за 2000 г. и Landsat 8 за 2021 г., сделанных при средних и сходных расходах воды, проходящих в пределах бровок пойм. Отобраны два снимка с минимальной облачностью: первый получен с Landsat 7 27.06.2000 при расходах воды 37900 м³/с, второй – Landsat 8 от 17.06.2021 при расходах воды 38200 м³/с. Спут-

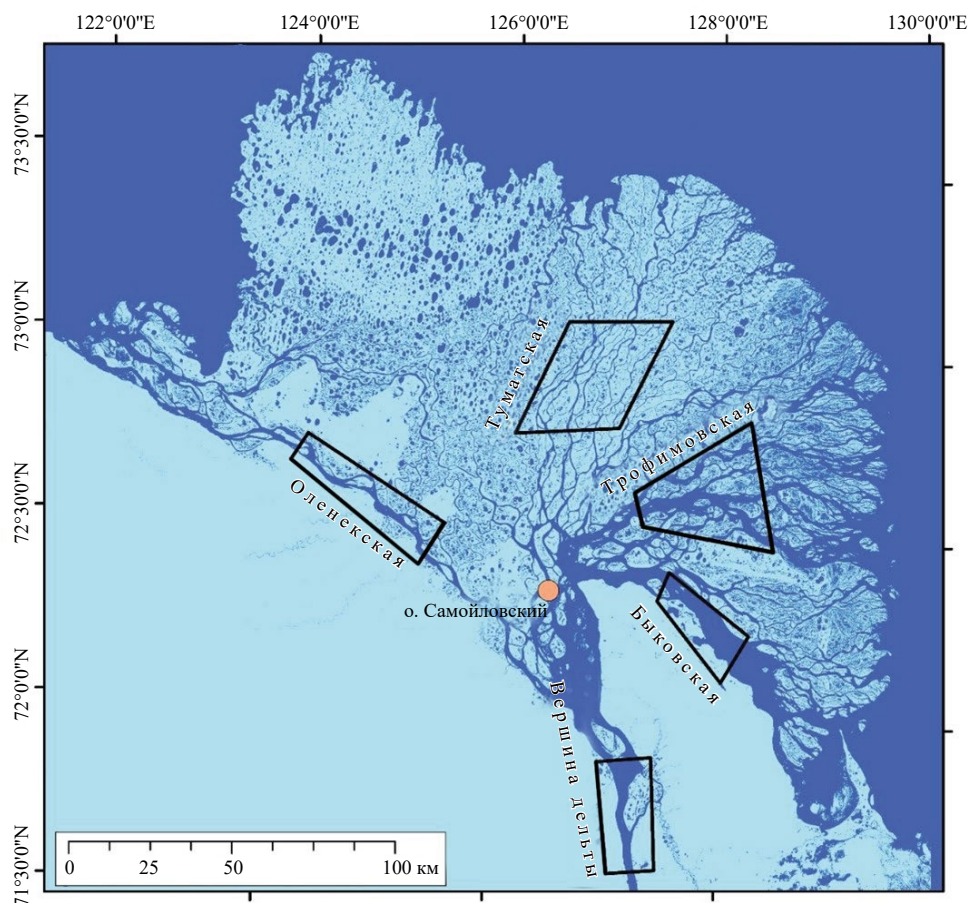


Рис. 1. Картограмма исследуемого объекта. Полигонами указаны участки расчета концентраций взвешенных веществ и метеорологических параметров.

никовыми снимками полностью охвачена центральная часть дельты, участки Оленекской и Быковской проток, большая часть Трофимовской и Туматской проток. Из анализа исключена северная часть дельты площадью 3.3 км² ввиду локальной облачности на снимке 2021 г.

Анализ возможного влияния русловых переформирований на сток взвешенных наносов проводился на основе составления карт полей мутности и дешифрирования отступаний берегов. Масштаб определения скорости переформирования соответствует разрешению снимков. Полученные площадные данные размывов осреднялись для ячеек регулярной сетки 5 км на 5 км, размер этой сетки обусловлен большой площадью дельты Лены (анализируемый участок составляет ~28 тыс. км²). Далее в каждой ячейке сетки проводился расчет суммы береговых разрушений (км²)

и среднего значения мутности (мг/л).

Для анализа возможного влияния метеорологических (суммы и средние за 1, 3, 5 и 7 сут для температуры воздуха, мерзлоты на глубинах 0 и 0.75 м, количества осадков, солнечной радиации и скорости ветра), гидрологических (расход воды в вершине дельты с учетом времени добега от г/п Кюсюр) и русловых (суммарные площади разрушений берегов за период с 2000 по 2021 г.) факторов на трансформацию стока взвешенных наносов на участке “вершина дельты — магистральный рукав” рассчитывался коэффициент корреляции $r_{\Delta S_{\text{фактор}}}$ между факторами и относительными изменениями мутности воды по длине каждой из четырех основных проток:

$$R_{\Delta S_{\text{фактор}}} = \frac{\sum (\Delta S_i - \overline{\Delta S})(\text{Фактор}_i - \overline{\text{Фактор}})}{\sqrt{\sum (\Delta S_i - \overline{\Delta S})^2} \sqrt{\sum (\text{Фактор}_i - \overline{\text{Фактор}})^2}}, \quad (5)$$

где ΔS_i – значения относительного изменения мутности на участке “вершина дельты – магистральный рукав” за дату i , $\overline{\Delta S}$ – среднее значение изменения мутности в базе данных; Фактор $_i$ – значение фактора за дату i , Фактор – среднее значение фактора в базе данных.

Для определения статистической значимости корреляций использовался t -критерий Стьюдента на уровне значимости $\alpha = 5\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общие закономерности распределения мутности воды в дельте

На основе расчетов продольного изменения мутности воды по четырем основным протокам дельты Лены (4) получено ее среднее изменение с учетом распределения стока воды за период с 2000 по 2022 г. (рис. 2), оцениваемое в диапазоне 2.4–4.8%. В Трофимовской протоке наблюдается преобладание случаев продольного увеличения мутности воды (в 25 случаях из 40), объясняемых в [16, 19] развитием термоэрозионных процессов в этой части дельты, отличающейся максимальным развитием ледового комплекса. В остальных протоках, меньших по водности, чаще бывают ситуации продольного уменьшения мутности. Из 69 случаев продольного уменьшения мутности в Оленекской и Туматской протоках был 41 случай повышения мутности, которые в большинстве случаев приурочены к прохождению максимальных расходов воды. Эти протоки имеют наибольшее количество неглубоких и нешироких ответвлений,

теряющих водообмен с ближайшими протоками при установлении меженных уровней [1], что, предположительно, определяет аккумулятивный режим этих частей дельты, особенно в межень. Для Быковской протоки характерны, в целом, очень незначительные изменения мутности воды.

Создана база данных суточных величин изменений мутности воды по длине рукавов дельты за даты доступных снимков Landsat и соответствующих количественных оценок возможных факторов, влияющих на трансформацию стока взвешенных наносов. Их сопоставление выполнено на основе корреляционного анализа (5).

Метеорологические и синоптические факторы

При анализе всей выборки (табл. 1) обнаруживается высокая корреляция ($r > 0.70$) между продольным изменением мутности в Оленекской протоке ($\Delta S_{\text{Олен}}$, %) и количеством осадков за один день:

$$\Delta S_{\text{Олен}} = 9.96 P_1 - 23.1, r = 0.77, \quad (6)$$

где P_1 – суммарное количество осадков за 1 день (мм).

Корреляция > 0.50 свойственна связи продольных изменений мутности воды в Туматской протоке ($\Delta S_{\text{Тумат}}$, %) и среднесуточной и средней скорости ветра за 1 и 3 сут. Полученные связи между параметрами статистически значимы согласно t -критерию Стьюдента и имеют вид:

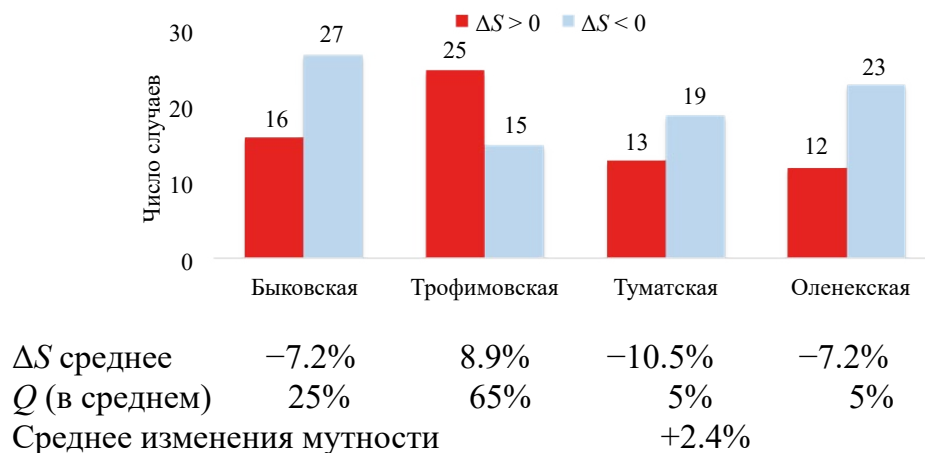


Рис. 2. Количественная характеристика изменения мутности по рукавам дельты с учетом перераспределения стока по рукавам.

Таблица 1. Корреляционный анализ изменений мутности воды по рукавам дельты и метеорологических и гидрологических параметров (статистически значимые корреляции согласно t -критерию Стьюдента на уровне значимости $\alpha = 5\%$ выделены жирным)

Параметр	$\Delta S, \%$			
	Быковская	Трофимовская	Туматская	Оленекская
Среднесуточная температура воздуха, °C	0.26	0.11	0.04	0.18
Σ температур за 3 дня, °C	0.28	0.07	0.10	0.27
Σ температур за 5 дней, °C	0.31	0.12	0.12	0.33
Σ температур за 7 дней, °C	0.32	0.19	0.12	0.32
Количество осадков за день, мм	−0.22	0.36	0.46	0.77
Σ осадков за 3 дня, мм	−0.13	−0.07	0.04	0.53
Σ осадков за 5 дней, мм	−0.21	−0.33	−0.11	0.24
Σ осадков за 7 дней, мм	−0.29	−0.27	−0.26	0.03
Среднесуточная скорость ветра, м/с	0.34	0.22	0.59	0.43
Средняя скорость ветра за 3 дня, м/с	0.37	0.40	0.58	0.44
Средняя скорость ветра за 5 дней, м/с	0.34	0.32	0.35	
Поток солнечной радиации, Вт/м ²	0.37	0.19	0.17	0.17
Σ солнечной радиации за 3 дня, Вт/м ²	0.38	0.20	0.29	0.26
Σ солнечной радиации за 5 дней, Вт/м ²	0.40	0.20	0.25	0.32
Σ солнечной радиации за 7 дней, Вт/м ²	0.40	0.22	0.26	0.29
Температура поверхности почвы, °C	0.15	−0.06	−0.12	0.07
Σ температур поверхности почвы за 3 дня, °C	0.12	−0.09	−0.04	0.21
Σ температур поверхности почвы за 5 дней, °C	0.18	0.02	−0.03	0.26
Σ температур поверхности почвы за 7 дней, °C	0.15	0.08	−0.02	0.17
Температура мерзлоты на глубине 0.75 м, °C	−0.03	0.18	0.47	0.56
Σ температур мерзлоты на глубине 0.75 м за 3 дня, °C	0.01	0.23	0.49	0.57
Σ температур мерзлоты на глубине 0.75 м за 5 дней, °C	0.00	0.22	0.48	0.56
Σ температур мерзлоты на глубине 0.75 м за 7 дней, °C	−0.04	0.19	0.46	0.53
Расход воды на г/п Кюсюр, м ³ /с	0.31	0.09	0.27	0.27

$$\Delta S_{\text{Тумат}} = 10.4\bar{U}_1 - 63.7, r = 0.59, \quad (7)$$

$$\Delta S_{\text{Тумат}} = 12.3\bar{U}_3 - 73.8, r = 0.58, \quad (8)$$

$\bar{U}_1$ – средняя скорость ветра за 1 сут (м/с); $\bar{U}_3$ – средняя скорость ветра за 3 сут (м/с).

Также корреляция высокая (> 0.50) для связи продольного изменения мутности в Оленекской протоке ($\Delta S_{\text{Олен}}, \%$) и температуры мерзлоты на глубине 0.75 м, а также ее сумм за 3, 5 и 7 сут. Они статистически значимы согласно t -критерию Стьюдента и имеют вид:

$$\Delta S_{\text{Олен}} = 23.9 \Sigma T(\text{мерз})_1 - 43.8, r = 0.56, \quad (9)$$

$$\Delta S_{\text{Олен}} = 8.31 \Sigma T(\text{мерз})_3 - 43.6, r = 0.57, \quad (10)$$

$$\Delta S_{\text{Олен}} = 4.83 \Sigma T(\text{мерз})_5 - 41.9, r = 0.56, \quad (11)$$

$\Sigma T(\text{мерз})_1$ – сумма значений температуры мерз-

лоты на глубине 0.75 м за 1 сут (°C), $\Sigma T(\text{мерз})_3$ – сумма значений температуры мерзлоты на глубине 0.75 м за 3 сут (°C), $\Sigma T(\text{мерз})_5$ – сумма значений температуры мерзлоты на глубине 0.75 м за 5 сут (°C).

Тенденции ($0.25 < |r| < 0.50$) в зависимости продольного увеличения мутности от метеорологических факторов прослеживаются для различных вариаций температуры воздуха, скорости ветра, солнечной радиации в Быковской протоке. Статистически значимые связи $\Delta S_{\text{Бык}}$ (%) в этой протоке с суммарной 5- и 7-дневной температурой воздуха, а также со средними скоростями ветра за 5 сут и суммой солнечной радиации описываются уравнениями:

$$\Delta S_{\text{Бык}} = 0.52 \Sigma T(\text{воздуха})_5 - 33.5, r = 0.31, \quad (12)$$

$$\Delta S_{\text{Бык}} = 0.46 \Sigma T(\text{воздуха})_7 - 33.5, r = 0.32, \quad (13)$$

$$\Delta S_{\text{Бык}} = 11.9\bar{U}_5 - 63.2, r = 0.34, \quad (14)$$

$$\Delta S_{\text{Бык}} = 0.2942 \Sigma W_1 - 48.2, r = 0.37, \quad (15)$$

$$\Delta S_{\text{Бык}} = 0.1015 \Sigma W_3 - 45.8, r = 0.38, \quad (16)$$

$$\Delta S_{\text{Бык}} = 0.0672 \Sigma W_5 - 46.3, r = 0.40, \quad (17)$$

$$\Delta S_{\text{Бык}} = 0.0528 \Sigma W_7 - 47.8, r = 0.40, \quad (18)$$

где $\Sigma T(\text{воздуха})_5$ — сумма значений температуры воздуха за 5 сут ($^{\circ}\text{C}$); $\Sigma T(\text{воздуха})_7$ — сумма значений температуры воздуха за 7 сут ($^{\circ}\text{C}$); $\bar{U}_5$ — средняя скорость ветра за 5 сут (м/с); ΣW_1 — суммарный поток солнечной радиации за 1 сут, ΣW_3 — сумма потока солнечной радиации за 3 сут (Вт/м^2); ΣW_5 — сумма потока солнечной радиации за 5 сут (Вт/м^2); ΣW_7 — сумма потока солнечной радиации за 7 сут (Вт/м^2).

Статистически значимые корреляции от 0.32 до 0.44 также установлены для Трофимовской ($\Delta S_{\text{Трофим}}$, %) и Оленекской ($\Delta S_{\text{Олен}}$, %) проток при анализе разной скорости ветра:

$$\Delta S_{\text{Трофим}} = 9.99\bar{U}_3 - 37.2, r = 0.40, \quad (19)$$

$$\Delta S_{\text{Трофим}} = 8.98\bar{U}_5 - 33.0, r = 0.32, \quad (20)$$

$$\Delta S_{\text{Олен}} = 7.45\bar{U}_1 - 43.8, r = 0.43, \quad (21)$$

$$\Delta S_{\text{Олен}} = 9.29\bar{U}_3 - 53.9, r = 0.44, \quad (22)$$

$$\Delta S_{\text{Олен}} = 9.42\bar{U}_5 - 55.5, r = 0.34, \quad (23)$$

где $\bar{U}_1$ — средняя скорость ветра за 1 сут (м/с); $\bar{U}_3$ — средняя скорость ветра за 3 сут (м/с); $\bar{U}_5$ — средняя скорость ветра за 5 сут (м/с).

Для выявления факторов, повышения мутности воды на участках расчета, отдельно проанализированы ситуации с продольным увеличением мутности, т. е. при $\Delta S > 0$. В отличие от общей выборки по всем изменениям мутности воды ((6)–(23)) для случаев увеличения мутности воды более четко прослеживается значимость влияния солнечной радиации; в частности, в Оленекской протоке приводящей к корреляции $0.50 < |r| < 0.70$. Значения коэффициента корреляции увеличиваются от $r = 0.52$ для среднесуточ-

ного потока радиации до $r = 0.66$ для суммарного потока за 5 дней до даты получения снимка. Несколько меньшее влияние солнечной радиации отмечено в протоках Быковской и Туматской, где r максимален для пятидневных сумм потока солнечной радиации (0.46 и 0.45 соответственно). В Туматской протоке продольное увеличение мутности зависит от суммарных за 5 и 7 дней значений среднесуточной температуры воздуха ($r = 0.42$ и 0.43). Также для Туматской протоки коэффициент корреляции находится в пределах 0.30–0.50 для пяти- и семидневных сумм температуры мерзлоты на поверхности ($r = 0.31$). Невысокие значения связи также наблюдаются между рядами температуры мерзлоты на глубине 0.75 м и продольного увеличения мутности воды в Быковской протоке ($r = 0.33$ –0.35).

Также рассматривались ситуации в Трофимовской протоке, при которых продольное увеличение мутности принимает максимальные значения ($\Delta S > 10\%$). В этом случае на сток взвешенных наносов начинает оказывать влияние среднесуточная температура и ее сумма за пятидневный период. Коэффициент корреляции увеличивается до 0.34.

При отдельном анализе ситуаций продольного уменьшения мутности воды вдоль рукавов обнаруживается, что факторы формирования стока наносов имеют неопределенный характер.

Полученные количественные соотношения между изменениями мутности воды в протоках дельты Лены и синоптическими и метеорологическими параметрами свидетельствуют о том, что в разных протоках ключевую роль в балансе наносов играют разные факторы. На продольное увеличение мутности в Оленекской протоке оказывает влияние повышение температуры мерзлоты, что может быть связано с оттаиванием многолетнемерзлых пород, которые слагают большую часть правого берега протоки. Увеличение температуры воздуха (рис. 3а) и мерзлоты приводит к разрушению берегов и формированию мутьевых потоков. В результате значимым фактором становится и солнечная радиация, которая приводит к активизации термических процессов в криолитозоне, в том числе к развитию процессов термоденудации берегов, представ-

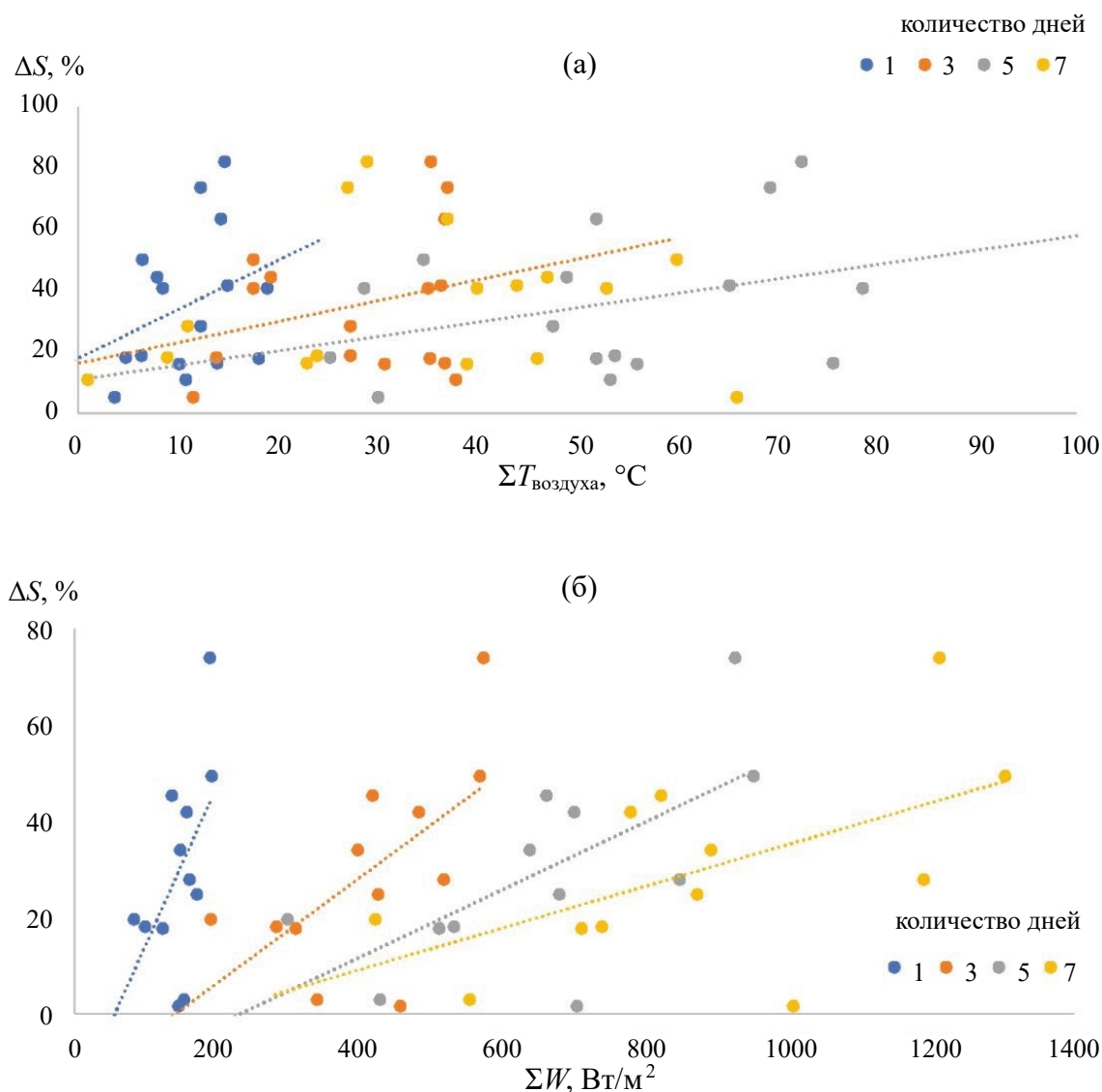


Рис. 3. Тенденция увеличения мутности воды в Оленекской протоке с возрастанием температуры воздуха (а) (за 1, 3, 5 и 7 сут), солнечной радиации (б) (сумма за 1, 3, 5 и 7 сут).

ленных многолетнемерзлыми породами. Именно в Оленекской протоке при увеличении потока солнечной радиации происходит продольное увеличение мутности воды (рис. 3б).

Особый интерес вызывают экстремальные изменения мутности воды, зафиксированные при дешифрировании отдельных снимков. В частности, максимальные продольные увеличения мутности воды установлены для участка Трофимовской протоки по данным дешифрирования спутникового снимка от 28.07.2012 ($\Delta S = 81.9\%$, абсолютные значения мутности возрас-

тали с 30.7 мг/л в вершине дельты до 55.8 мг/л). Именно для этого периода характерны максимальные значения температуры воздуха и температуры мерзлоты в базе данных (Σ значений температуры воздуха за 5 дней составила 72.5°C , Σ значений температуры мерзлоты на поверхности за 7 дней составила 79.8°C) (рис. 4).

Достоверное влияние ветра на мутность воды связано с ветровым волнением, приводящим к взмучиванию донных отложений, и сгонно-нагонными явлениями. Статистически достоверные корреляции наблюдаются между продоль-

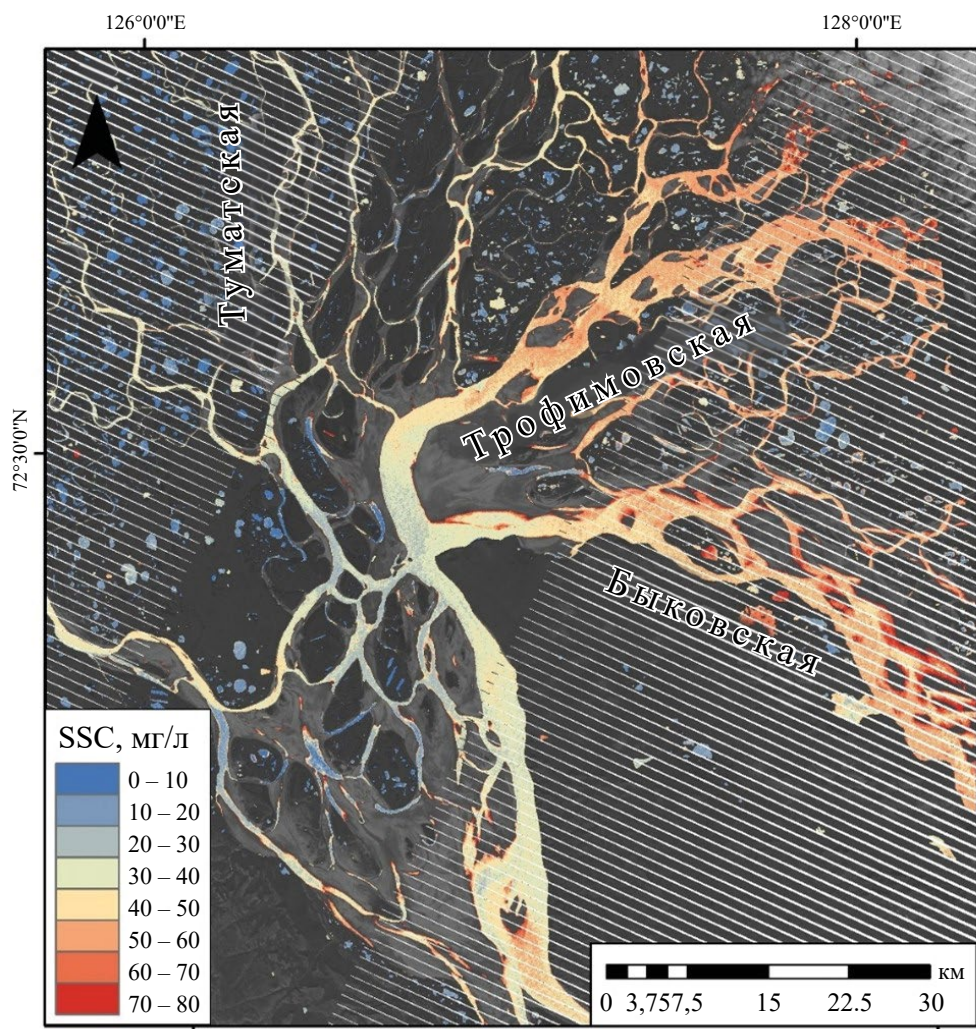


Рис. 4. Картограмма полей мутности воды по результатам дешифрирования спутникового снимка от 28.07.2012 при $\Delta S_{\text{Трофимовская}} = 81.9\%$.

ным изменением мутности воды в Туматской протоке и средней скоростью ветра. Здесь при увеличении среднесуточной и средней за 1 и 3 сут скорости ветра происходит продольное увеличение мутности воды (рис. 5).

На графике связи между ΔS и скоростями ветра в Туматской протоке максимальные продольные изменения мутности воды (рис. 5, цифра I) соответствуют ситуации от 28.07.2012, когда на участке “вершина дельты – Туматская протока” происходило увеличение мутности воды на 30.9% (рис. 4). В день получения снимка скорость ветра составляла 6.31 м/с, а средняя за 3 сут – 6.16 м/с. Возрастание скорости ветра выше 2–3 м/с приводит к увеличению волновой деятельности на всех участках проток. Ветровое

перемешивание в центральной части дельты на широком участке рассредоточения стока, а также вовлечение песчаных отложений, слагающих дно русла, привели к взмучиванию донных осадков и перетоку их в Туматскую протоку.

Аналогичные ситуации обозначены цифрами II и III на рис. 5. В данном случае выделенным точкам соответствуют спутниковые снимки от 11.08.2011 (II) и 10.06.2018 (III). В этих ситуациях мутность воды продольно увеличивается на 51.4 и 41.5% соответственно. Увеличение может быть вызвано повышением средней скорости ветра до 8.53 м/с (11.08.2011) и до 6.65 м/с (10.06.2018).

Высокие значения корреляции между скоростью ветра и продольным изменением мутности

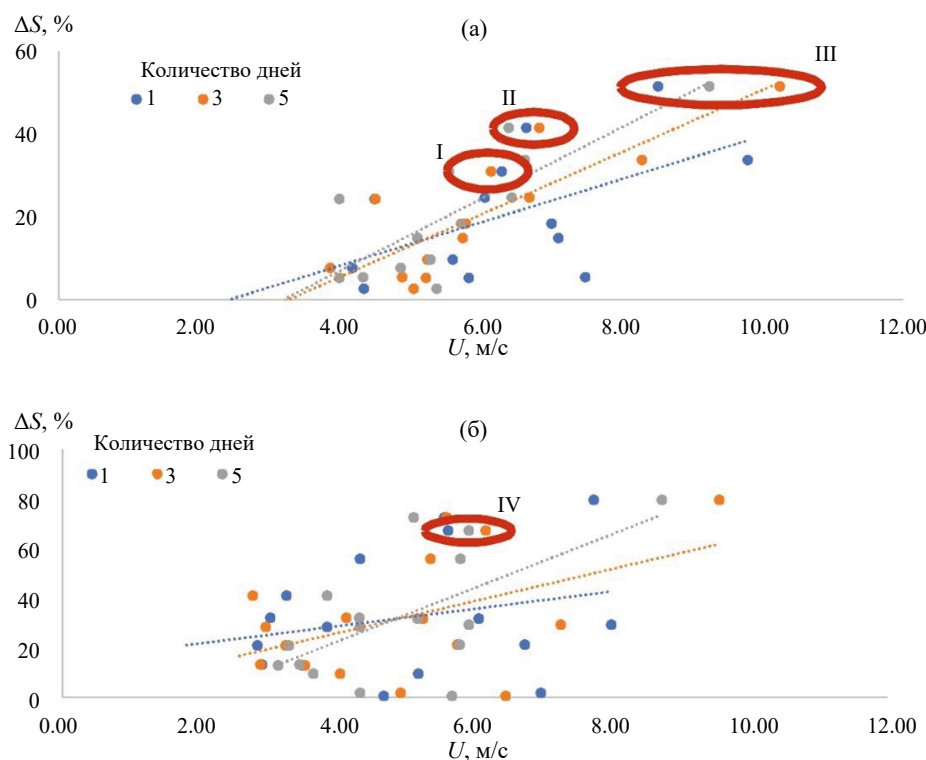


Рис. 5. Тенденция продольного увеличения мутности воды в Туматской протоке (а), Быковской протоке (б) с возрастанием скорости ветра (среднее за 1, 3, 5 сут). Цифрами (I–IV) обозначены случаи изменения мутности воды, рассмотренные в тексте статьи.

воды зафиксированы и для Быковской протоки. Здесь на обширных участках, где ширина русла достигает 8 км, вдоль левого берега расположена песчаная отмель с малыми глубинами, происходят масштабные взмучивания песчаных отложений, что также влияет на формирование шлейфов повышенной мутности. Например, на снимке от 10.06.2018 (точки под номером IV) зафиксирована ситуация, где при скорости ветра до 6 м/с продольное изменение мутности воды составило 63.1% (рис. 6).

Увеличение концентрации взвешенных наносов с ростом скорости ветра подтверждается результатами наблюдений авторов в 2022 г. При скорости ветра от 4.5 до 6.2 м/с наблюдалось взмучивание донных отложений у о. Самойловского: мутность возросла до 35% — с 24.3 мг/л (по данным отбора 11.08.2024) до 32.1 мг/л (14.08.2024). Уменьшение среднесуточной скорости ветра до 3.5 м/с, наоборот, привело к аккумуляции взвеси и снижению мутности до 14.2 мг/л (15.08.2024).

Гидрологические факторы

Влияние водности р. Лены на условия прохождения взвешенных наносов анализировалось на основе деления всей базы данных на две составляющие: изменения мутности воды при расходе воды выше и ниже среднего в выборке (37500 м³/с), соответствующие выходу воды на низкую пойму.

При больших величинах расхода воды ($Q > 37500$ м³/с) увеличение мутности потока по длине рукавов фиксируется на снимках наиболее часто. В итоге значимые корреляции (на уровне $\alpha = 5\%$) ΔS с водностью повышаются до 0.57 и 0.58 для таких проток, как Туматская и Оленекская. С повышением расхода воды мутность продольно увеличивается и в Быковской, и в Трофимовской протоках. Здесь корреляции ниже и принимают значения 0.44 и 0.34 соответственно, однако статически незначимы (согласно t -критерию Стьюдента на уровне значимости $\alpha = 5\%$). Указанные соот-

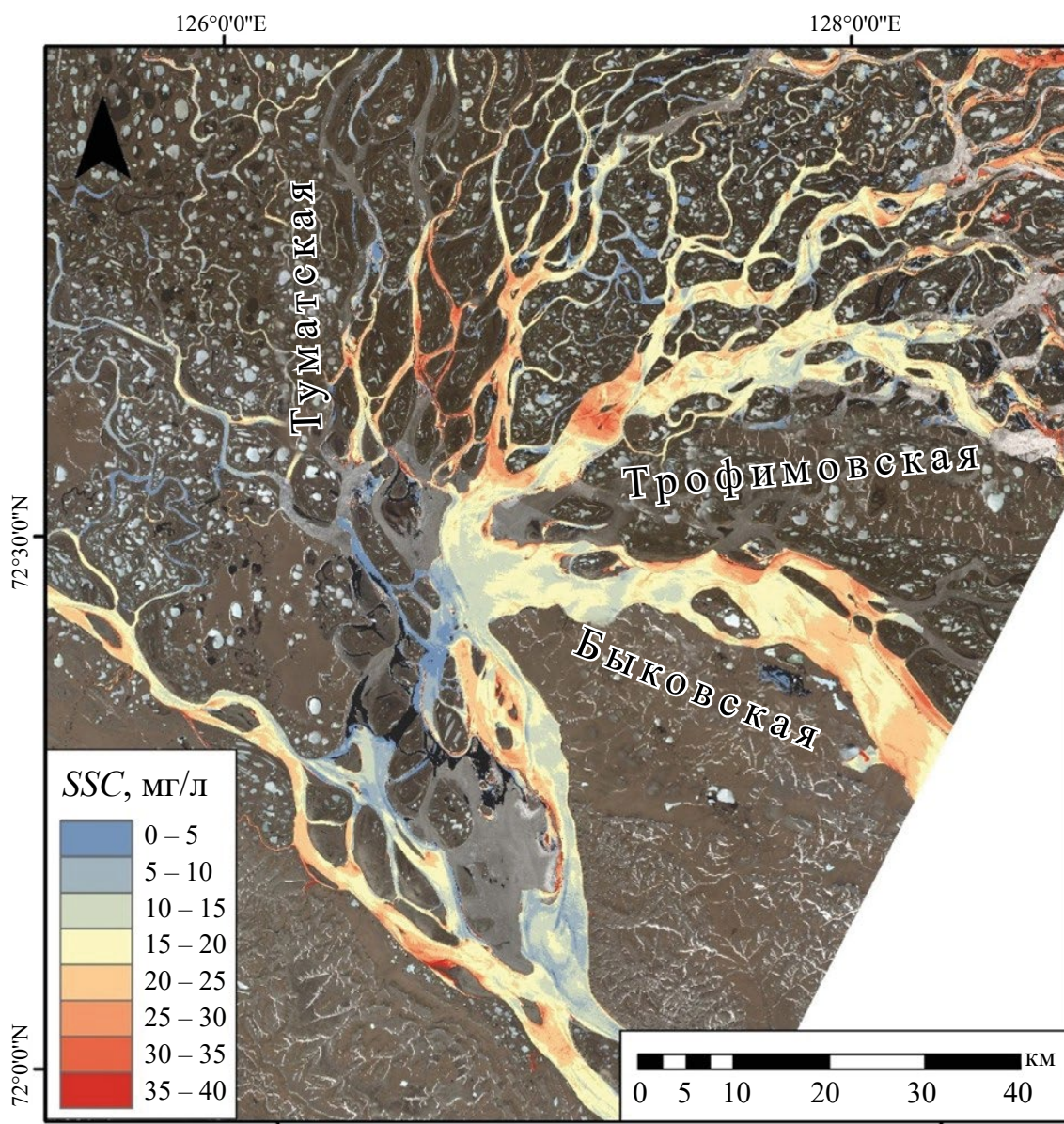


Рис. 6. Картограмма полей мутности воды по результатам дешифрирования спутникового снимка от 10.06.2018 при $\Delta S_{\text{Туматская}} = 41.5\%$ (скорость ветра 6.8 м/с), $\Delta S_{\text{Быковская}} = 63.1\%$ (скорость ветра 6.2 м/с).

ношения описываются следующими уравнениями:

$$\Delta S_{\text{Бык}} = 0.0012Q - 70.6, r = 0.44, \quad (24)$$

$$\Delta S_{\text{Трофим}} = 0.0006Q - 28.1, r = 0.34, \quad (25)$$

$$\Delta S_{\text{Тумат}} = 0.0013Q - 81.5, r = 0.57, \quad (26)$$

$$\Delta S_{\text{Олен}} = 0.0017Q - 101.5, r = 0.58, \quad (27)$$

где Q — расход воды в вершине дельты ($\text{м}^3/\text{с}$).

Увеличение мутности воды вдоль дельтовых рукавов прослеживается на спутниковых сним-

ках от 10.07.2018 ($78\,100\, \text{м}^3/\text{с}$) и 22.07.2007 ($Q = 77\,500\, \text{м}^3/\text{с}$).

При расходах $< 37\,500\, \text{м}^3/\text{с}$ (в основном август–сентябрь) влияние водности значительно снижается во всех протоках. Наоборот, увеличивается роль метеорологических факторов в формировании стока взвешенных наносов.

Закономерности влияния гидрологических факторов на распределение мутности воды в дель-

те Лены кардинально отличаются от закономерностей для южных дельт. В частности, в дельтах Селенги и Верхней Ангары [17] при увеличении расхода воды речные воды заполняли заросшие пойменные массивы, на которых большая часть наносов аккумулировалась. В выполненном анализе для дельты Лены с изменением диапазонов от 17400 до 78100 м³/с затопление значительных пойменных поверхностей не происходит, под водой оказываются лишь осередки, которые в условиях арктического климата не зарастают растительностью. Также при увеличении расхода воды наблюдается закономерное увеличение мутности воды, которое, скорее всего, связано с размывающей способностью потока.

Русловые факторы

Влияние синоптических и гидрологических факторов на изменения мутности воды в рукавах дельты Лены в конечном счете связано с их влиянием на режим русловых деформаций. Для пространственного анализа береговых отступаний введен индекс интенсивности разрушения, рассчитываемый по отношению площади отступления к площади водной поверхности внутри каждой ячейки регулярной сетки.

Общая площадь отступаний за период с 2000 по 2021 г. (21 год) на участке 30 тыс. км² дельты (площадь русла — 6 630 км²) составила 65.6 км², т. е. на рассматриваемом участке дельты Лены разрушениям было подвержено в год в среднем ~3.13 км² площади островов дельты.

Отступление берегов увеличивается от верхних частей рукавов к морскому краю дельты, где усиливается абразионная деятельность моря Лаптевых. Интенсивность русловых деформаций различается по секторам дельты. Наибольшей интенсивностью (до 15% русла) русловых деформаций отличается продолжение Трофимовской протоки — Сардахская протока, где на о. Собо-Сисе интенсивность отступления берегов достигает 15 м/год.

Ключевой причиной влияния на сток становится распространение многолетнемерзлых пород, а на участках Оленекской и Трофимовской проток — ледового комплекса, где объемная доля

подземного льда в береговых грунтах достигает 90%. В Трофимовской протоке такие отложения находятся на уровне межennaleго уреза воды. Особенность ледового комплекса — содержание фракций малого диаметра [23], которые при разрушении берегов повышают мутность воды и не оседают ввиду малой транспортирующей способности потока и гидравлической крупности наносов. Кроме того, высокая льдистость отложений способствует термическому разрушению берегов водами Лены и потоками воздуха, что также приводит к повышению мутности воды.

Характерные иллюстрации влияния русловых деформаций на сток взвешенных наносов в дельте Лены — ситуация, зафиксированная на снимке 27.08.2020 ($Q = 32600$ м³/с), в этот день наблюдалось одно из наибольших увеличений мутности по длине Трофимовской протоки ($\Delta S = 50.0\%$). Если в истоке Трофимовской протоки мутность воды составляла 15–20 мг/л, то в среднем течении она увеличивается до 35 мг/л с максимумами, достигающими 50 мг/л в отдельных частях рукава. На основе сопоставления карты полей мутности, полученной в ходе дешифрирования снимка от 27.08.2020, и участков разрушений берегов в пределах Трофимовской протоки за 2000–2021 г. установлено совпадение участков повышенной мутности и максимальных отступаний берегов (рис. 7). Участки увеличения мутности воды совпадают с ростом площади отступления островов (индекс интенсивности разрушений достигает 15%). Для этого снимка получено уравнение тенденции, выражающее изменения мутности воды с увеличением площади разрушений на участке Трофимовской протоки ($R^2 = 0.24$):

$$SSC = 2.14 \ln(S_{\text{отступ}}) + 36.2, \quad (28)$$

где SSC — концентрация взвешенных частиц (мг/л), $S_{\text{отступ}}$ — площадь береговых отступаний (км²).

Значительно меньше интенсивность переформирований в Туматской (до 5%), Оленекской (до 5%), и Быковской (0%) протоках. Это связано с максимальным распластыванием уровней и уменьшением транспортирующей способности из-за большей длины рукавов: в Быковской протоке уклон русла оценивается 0.01 м/км, а в

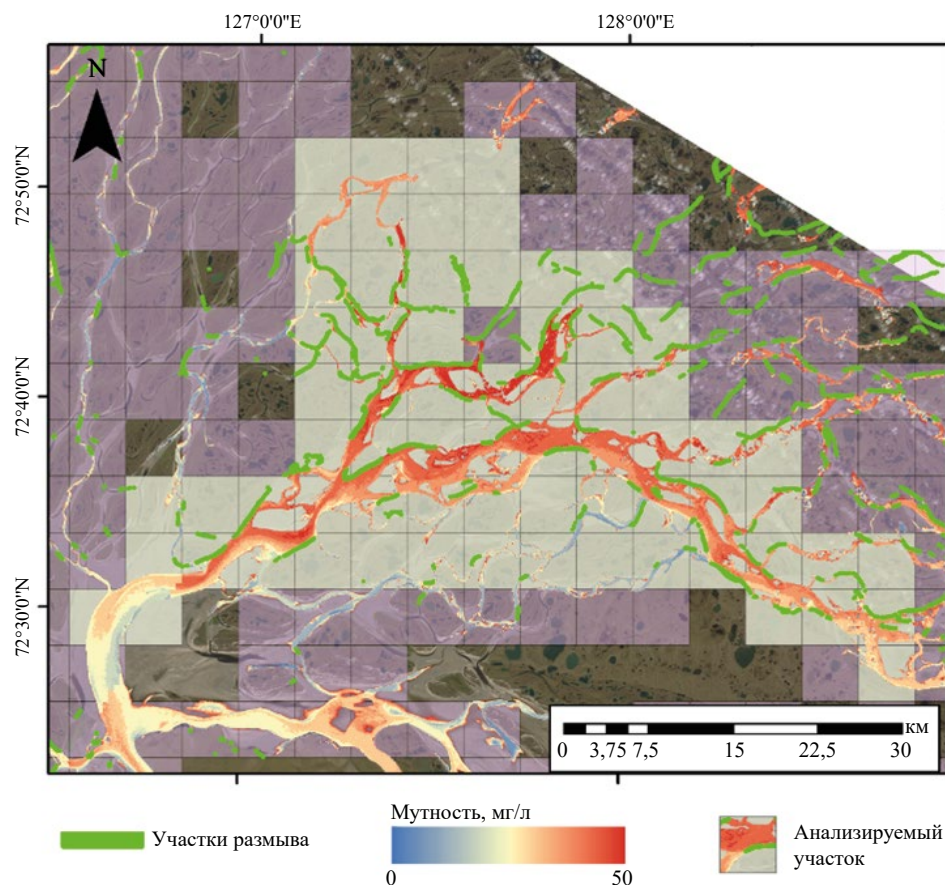


Рис. 7. Картосхема полей мутности воды и участков размыва вдоль Трофимовской протоки.

Оленекской протоке — 0.005 м/км. В Быковской протоке русловые факторы незначительны из-за геолого-геоморфологических условий этой части дельты. Правый берег протоки здесь представлен коренными породами Хараулахского хребта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ причин увеличения мутности воды в дельте и полученные результаты оценки метеорологических, гидрологических и русловых факторов впервые дают полноценную характеристику стока взвешенных наносов и закономерностей его трансформации в условиях распространения многолетнемерзлых пород.

Создана база данных по метеорологическим, гидрологическим и русловым факторам и характеристикам распределения мутности воды по четырём крупнейшим направлениям стока дельты Лены.

Проанализировано влияние синоптической ситуации (температуры воздуха, осадков, ветра, солнечной радиации, температуры многолетнемерзлых пород) на распределения мутности воды и на относительное изменение концентрации взвешенных частиц по рукавам.

Рассмотрены связи расхода воды и мутности воды в вершине дельты с относительным изменением мутности воды по рукавам дельты. Обнаружены закономерности возрастания мутности воды с увеличением расхода воды, что объясняется ландшафтными особенностями (отсутствием задерживающей растительности на пойме) дельты.

Рассчитаны величины интенсивности отступления берегов за 2000–2021 гг. Установлено, что увеличение стока взвешенного вещества в первую очередь связано с русловыми переформированиями, которые интенсифицируются в условиях климатически обусловленной термоэрозии берегов.

Для дельты Лены в среднем характерно увеличение стока взвешенных наносов по рукавам. Увеличение связано с большей водностью Трофимовской протоки, несмотря на преобладание отрицательных балансов в общей выборке.

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. *Луков А.Ю.* Гидробиология устьевой области реки Лены. М.: Науч. мир, 2001. 288 с.
3. *Иванов В.А., Чалов С.Р.* Эмпирическая модель распределения взвешенных наносов по глубине крупных рек // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. № 2. С. 149–164.
4. *Иванов В.В., Пискун А.А., Корабель Р.А.* Распределение стока по основным рукавам дельты Лены // Тр. ААНИИ. 1983. С. 59–71.
5. *Конищев В.Н.* Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2009. № 4. С. 10–20.
6. *Кортаев 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. Противоэрозионная защита и регулирование русел. М.: Изд-во Московского ун-та, 1990. С. 120–144.
7. *Лопатин Г.В., Федоров М.К.* Физико-географический очерк дельты р. Лены. АНИИ. Л.: АНИИ, 1947. 320 с.
8. *Магрицкий Д.В., Айбулатов Д.Н., Горелкин А.В.* Закономерности пространственно-временной изменчивости стока на предустьевом участке и в дельте р. Лены // Вод. ресурсы. 2018. Т. 45. № 1. С. 15–29. DOI: 10.7868/S0321059618010133
9. *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. DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-2-171-190
10. *Тасаков П.Д.* Сток взвешенных наносов в устье р. Лены // Тр. ГГИ. 1965. № 125. С. 125–138.
11. *Федорова И.В., Большаинов Д.Ю., Макаров А.С., Третьяков М.В., Четверова А.А.* Современное гидрологическое состояние дельты р. Лены // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М.: Изд-во МГУ, 2009. С. 278–291.
12. *Федорова И.В., Четверова А.А., Алексеева Н.К., Скороспехова Т.В., Романов С.Г., Большаинов 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.
13. *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: ЮНЦ, 2009. С. 351–354.
14. *Alabyan A.M., Chalov R.S., Korotaev V.N., Sidorchuk A.Y., Zaitsev A.A.* Natural and technogenic water and sediment supply to the Laptev Sea // Berichte zur Polarforschung (Reports on Polar Research). 1995. № 182. P. 264–271.
15. *Boike J., Nitzbon J., Anders K., Grigoriev M., Bolshiyakov D., Langer M., Lange S., Bornemann N., Morgenstern A., Schreiber P., Wille C., Chadburn S., Gouttevin I., Burke E., Kutzbach L.* A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active-layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote-sensing data and land surface, snow, and // Earth Syst. Sci. Data. 2019. V. 11. P. 261–299. DOI: doi.org/10.5194/essd-11-261-2019
16. *Chalov S., Prokopeva K.* Sedimentation and Erosion Patterns of the Lena River Anabranching Channel // Water. 2022. V. 14. № 23. P. 3845. DOI: 10.3390/w14233845
17. *Chalov S., Prokopeva K., Habel M.* North to South Variations in the Suspended Sediment Transport Budget within Large Siberian River Deltas Revealed by Remote Sensing Data // Remote Sensing. 2021. V. 13. № 22. P. 4549. DOI: 10.3390/rs13224549
18. *Chalov S., Prokopeva K., Magritsky D., Grigoriev V., Fingert E., Habel M., Juhls B., Morgenstern A., Overduin P.P., Kasimov N.* Climate change impacts on streamflow, sediment load and carbon fluxes in the Lena River delta // Ecol. Indicators. 2023. V. 157. P. 111252. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111252
19. *Chalov S.R., Moreido V.M., Prokopeva K.N., Efimov V.A.* Implications of yedoma bank outcrops on the arctic rivers sediment runoff // Hydrosphere. Hazard processes and phenomena. 2022. V. 4. P. 165–182 (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.165

20. Chalov S.R., Prokopeva K.N. Assessment suspended sediment budget of the Lena River delta based on the remote sensing dataset // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2021. № 3. P. 19–29.
21. 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 // *Biogeosci.* 2022. V. 20. № 7. P. 1423–1441. DOI: 10.5194/bg-20-1423-2023
22. Rachold V., Alabyan A.M., Hubberten H.W., Korotaev V.N., Zaitsev A.A. Sediment transport to the Laptev Sea – Hydrology and geochemistry of the Lena River // *Polar Res.* 1996. V. 15. № 2. P. 183–196. DOI: 10.3402/polar.v15i2.6646
23. Schwamborn G., Rachold V., Grigoriev M.N. Late Quaternary sedimentation history of the Lena Delta // *Quaternary Int.* 2002. DOI: 10.1016/S1040-6182(01)00084-2

The factors of suspended sediment concentration increasing in the Lena River delta

K. N. Prokopeva*, S. R. Chalov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

Water Problems Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, 119333 Russia

**e-mail: prokris3@mail.ru*

This paper presents an analysis of the factors contributing to the longitudinal increase in suspended sediment along the Lena River delta branches. Satellite images (Landsat 5-9) from 2000 to 2022 during the open channel period from June to September were captured for the suspended sediment concentration modeling. This period coincides with the water discharge in the Lena River ranging from 17,400 to 78,100 m³/s. The ERA5-Land reanalysis, monitoring observations at the Samoilovsky Island research station and remote sensing data were employed to estimate the factors influencing suspended sediment concentration changes. These factors included air temperature, precipitation, wind speed, solar radiation flux, permafrost temperature, water discharge and suspended sediment concentration in the top of the delta top, and the intensity of bank retreat. The results of the correlation analysis indicated that the observed increase in suspended sediment concentration was attributable to a combination of meteorological factors (temperature, precipitation, wind speed, and solar radiation flux) and the intensity of riverbank erosion associated with thermal processes. The longitudinal increase in in suspended sediment concentration (on average for the study period by 2-4% along the delta length) can be explained by an average daily air temperature and permafrost temperature increase. The analysis demonstrated that temperature factors exert a predominant influence on riverbanks comprising the Ice Complex. here was a significant correlation between the rates of riverbank degradation and the concentration of suspended sediment.

Keywords: suspended sediment concentration, satellite images, permafrost, planform changes, Landsat, thermal erosion, Arctic.