

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ОЦЕНКА БАЛАНСА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ В ДЕЛЬТЕ Р. ЛЕНА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2021 г. С. Р. Чалов<sup>а</sup>, \*, К. Н. Прокопьева<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,  
Москва, Россия

\*E-mail: srchalov@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 01.10.2020 г.

В статье представлены результаты оценки баланса взвешенных наносов в пределах крупнейшей много-рукавной дельты р. Лена. Адаптирована методика оценки мутности в рукавах на основе коллекции снимков (31 изображение) спутниковой системы Landsat за 2000–2019 гг. Сделан вывод о важнейшей роли криогенных процессов разрушения сложенных многолетнемерзлыми породами берегов в продольном изменении потока взвешенных наносов. Показано, что с возрастанием среднесуточных температур воздуха от 5 до 14°C наблюдается продольное увеличение мутности воды по длине основных рукавов дельты р. Лена, что объясняется активизацией процессов термоэрозии и термоденудации. Выявлено, что исключительно высокая интенсивность этих процессов характерна для левых берегов южной экспозиции субширотно ориентированной Быковской протоки дельты Лены.

*Ключевые слова:* дельта р. Лена, баланс наносов, дистанционное зондирование, космические снимки, Landsat, термоэрозия, термоденудация, криолитозона

DOI: 10.31857/S0205961421030027

#### ВВЕДЕНИЕ

Материковый литогеохимический сток – важнейшая составляющая взаимодействия суши и океана. Его изученность связана, в первую очередь, с гидрологическими наблюдениями на постах, расположенных в нижнем течении рек, однако часто – на значительном удалении от приемных водоемов. Ниже этих постов в устьевых областях рек происходят масштабные процессы осаждения и фильтрации растворенных и взвешенных веществ. Считается, что в океан выносятся около 5–7% от взвешенных и 60–80% от растворенных веществ речного стока, поступающих в устьевые зоны рек мира (Лисицын, 1994). Гидрологические наблюдения позволяют охарактеризовать лишь около 90% мирового речного стока в океан (Milliman, Farnsworth, 2013). Все это определяет задачу изучения процессов изменения материкового стока в устьевой зоне.

Наиболее сложные изменения материкового стока воды и стока наносов происходят в пределах дельт. Здесь, вследствие снижения уклонов водной поверхности и транспортирующей способности потока, наблюдается осаждение взвешенных наносов. При этом эрозионно-аккумулятивные процессы в дельтах имеют сезонный режим. В южных дельтах рек умеренного и субтропического пояса (рек Волга, Селенга, Верхняя Ангара) (Чалов и др., 2017) увеличение уровня воды приводит к затоплению пойм и осередков (поймы и осередки чаще всего покрыты травяни-

стой растительностью, удерживающей взвешенные наносы), и вследствие изменения шероховатости на их поверхности аккумулируются наносы. При малых расходах воды большая часть наносов проходит через эти дельты транзитом (Chalov et al., 2020).

В дельтах арктических рек, расположенных в условиях распространения вечной мерзлоты, закономерности переноса вещества осложняются криогенными процессами. Боковая и речная эрозия, термоэрозия и термоденудация льдистых берегов (Григорьев, 1993) приводят к разрушению и медленному таянию берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, и увеличению стока взвешенных наносов. Повсеместное усиление таяния вечной мерзлоты (Котляков и др., 2020; Gavrilov, Pizhankova, 2018) в условиях потепления климата может становиться определяющим процессом в изменении потока взвешенных наносов через дельты северных рек. Подобные явления, в частности, характерны для крупнейшей дельты полярных широт – дельты р. Лена, не изученные вследствие отсутствия регулярных наблюдений до настоящего времени. Разовые наблюдения за характеристиками стока наносов приводили к противоположным выводам о факторах и закономерностях формирования баланса наносов. Так, по данным экспедиций МГУ, лишь от 10 до 30% материала, поступающего в дельту Лены, достигает моря Лаптевых по основным рукавам дельты (Коротаев и др., 1990). Сходные цифры приводи-

лись в работах (Федорова и др., 2009; Чаркин и др., 2009). В работе, выполненной на основе дешифрования снимков Landsat 8, приводятся аргументы, подтверждающие теорию аккумуляции наносов в пределах дельтового участка (Кравцова, Инюшин, 2019). В то же время по данным (Rachold et al., 2000) большая часть твердого вещества проходит через дельту транзитом и достигает морского края, а М.Н. Григорьев (Григорьев, 1993) указывал на продольное увеличение концентрации взвешенных наносов.

Подобная неопределенность выводов о режиме эрозионно-аккумулятивных процессов в дельте р. Лена связана с эпизодическим нерегулярным характером наблюдений, обусловленных трудоемкостью проведения гидрометрических работ по ее акватории. Доступные данные о мутности воды и распределении взвешенных наносов по рукавам характеризуют лишь случайные ситуации. Нет сведений о роли разрушения берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, в балансе наносов. Технология дистанционного определения мутности воды (по космическим снимкам), успешно применявшаяся ранее для речных (Park, Latrubesse, 2014; Wang et al., 2009) и дельтовых участков (Chalov et al., 2017; Long, Pavelsky, 2013; Pavelsky, Smith, 2009) крупных рек, позволяет на принципиально новом информационном уровне осветить эти проблемы. В данной работе проводится оценка трансформации стока взвешенных наносов по всей акватории дельты р. Лена для выявления роли криогенных процессов на основе дешифрирования мутности воды по снимкам Landsat при разных гидрологических и синоптических условиях.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Дельта р. Лена — одна из крупнейших речных дельт мира. Она занимает первое место по площади среди дельт России и является важным седиментационным барьером, оказывающим влияние на поступление взвешенных наносов в воды моря Лаптевых (Лопатин, Федоров, 1947). Дельта Лены состоит из четырех крупных рукавов, которые стали объектом исследования — Быковская протока, Трофимовская протока, Туматская протока и Оленекская протока. На долю правых протоков — Быковской и Трофимовской — приходится 85% общего стока воды и примерно 75% общего стока твердого вещества. Туматская и Оленекская протоки являются старейшими на сегодняшний день частями дельты, которые отличаются небольшими глубинами и наличием многочисленных нешироких протоков. Вся территория дельты находится в зоне распространения многолетнемерзлых пород, мощность которых достигает 500–600 м (Григорьев и др., 1996), в то время как мощность активного слоя составляет 20–40 см (Andreev et al., 2004). В толще многолетнемерзлых пород встречаются жилы, линзы и большие скопления под-

земного льда, так называемого “ледового комплекса”, участвующего в развитии криогенных процессов.

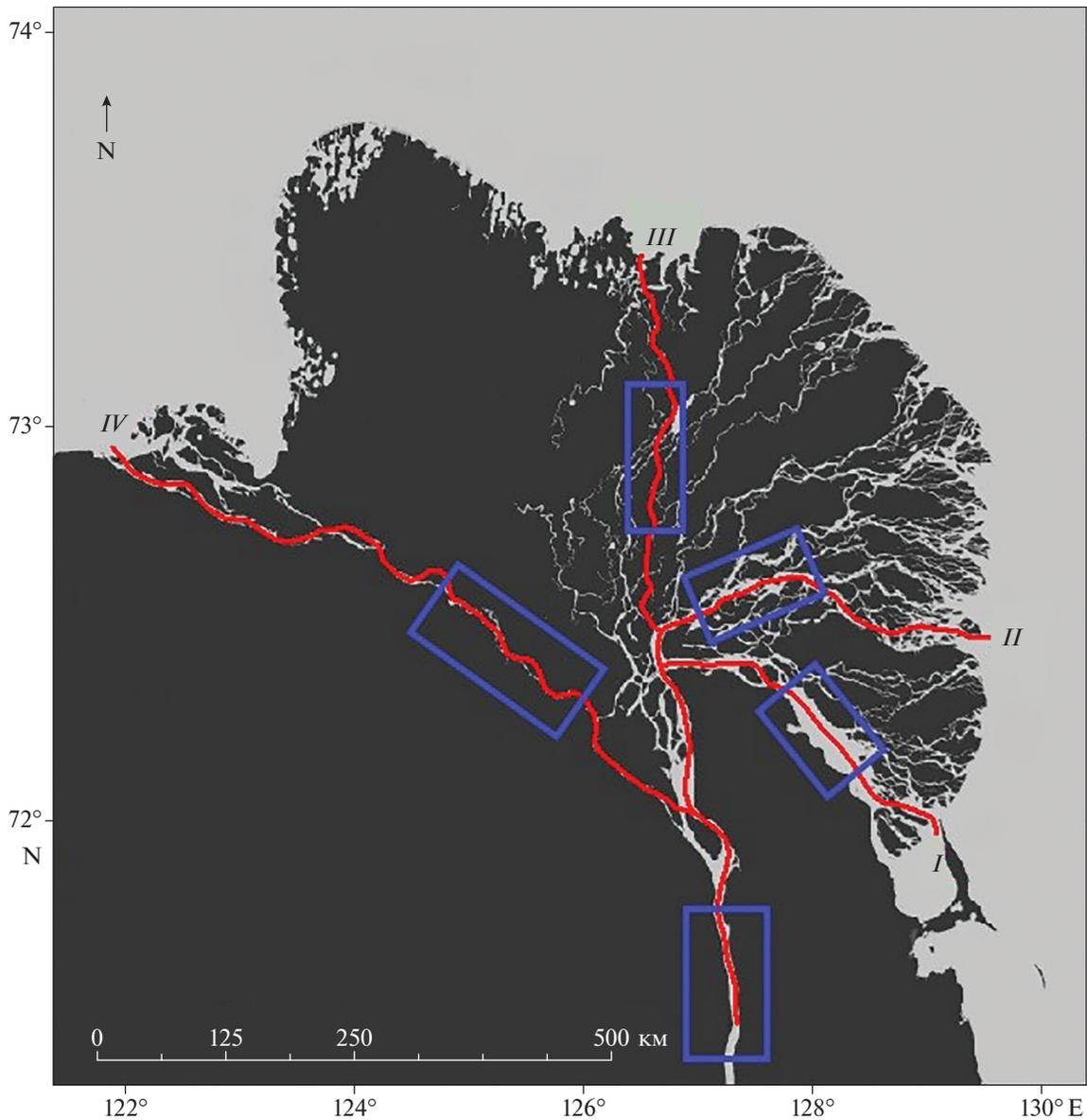
Изучение качества поверхностных вод с помощью методов дистанционного зондирования привлекло внимание ученых с момента запуска первого спутника Земли в 1972 г. (Лабутина и др., 1976; Кравцова, Антонова, 1974). Благодаря оптическим свойствам концентрации взвешенных наносов (мутность воды,  $S$ , мг/л) демонстрирует устойчивую связь с цветом поверхностной воды (Albanakis, 1990; Bhargava, Mariam, 1991; Doxaran et al., 2002; Forget et al., 1999; Novo et al., 1989). Отклики на видимую световую часть электромагнитного спектра в зависимости от концентрации наносов на поверхности воды позволяют получить абсолютные значения мутности воды по космическим снимкам, поскольку поверхностное отражение в значительной степени связано с рассеянием взвешенных веществ на поверхности воды (Kirk, 1989; Miller, Cruise, 1995). В работе при оценке мутности используется красный канал, так как в нем наблюдаются наибольшие корреляции параметра яркости с мутностью воды (Doxaran et al., 2002; Miller, Cruise, 1995; Wang et al., 2007).

Были использованы снимки, полученные со съемочных систем Landsat 5, Landsat 7 и Landsat 8, пространственное разрешение которых составляет 30 м. Всего обработан 31 космический снимок за период с 2000 по 2019 г. Расчет перехода от оптической яркости снимка к значениям мутности производился на основе привязки к полевым данным (Тарасов, Тутубалина, 2018). Для составления карт в физических величинах концентрации взвеси в воде была использована эмпирическая зависимость, связывающая коэффициент отражения с концентрацией взвешенных частиц. В работе используется модель с высокой точностью определения концентрации взвеси, полученная ранее авторами для участка среднего течения р. Лена (от г. Якутска до устья р. Вилюй), где на основе полевых данных и серии космических снимков была выведена зависимость между мутностью и коэффициентом отражения ( $r = 0.91$ ):

$$S = \frac{540.27 \times \rho - 2.611}{10000},$$

где  $S$  — мутность воды, мг/л,  $\rho$  — коэффициент отражения на снимке. Точность методики подробно обсуждалась в (Чалов и др., 2019).

Оценка продольных изменений стока взвешенных наносов в пределах дельтовой области проводилась на основе 4 профилей по геометрическому центру русла (рис. 1): 1) Главное русло — Быковская протока, 2) Главное русло — Трофимовская протока, 3) Главное русло — Туматская протока, 4) Главное русло — Оленекская протока.



**Рис. 1.** Карта-схема дельты р. Лена: *I* – Быковская протока, *II* – Трофимовская протока, *III* – Туматская протока, *IV* – Оленекская протока. Квадратами обозначены полигоны определения мутности воды  $S$  для оценки баланса наносов по длине проток.

Для каждого из выделенных рукавов строился продольный профиль изменения концентрации взвешенных наносов. Значение мутности в пределах рассматриваемых участков рассчитывалось как среднее между пикселями, содержащими данные о концентрации взвешенного вещества. Изменение концентрации взвеси ( $\Delta S_0$ ) по длине дельты рассчитывалось по формуле:

$$\Delta S_0 = S_2 - S_1,$$

где  $S_1$  и  $S_2$ , мг/л – значения концентрации взвешенных частиц в верхних (вершина дельты – участок Главного русла) и нижних частях рукавов соответственно (см. рис. 1). Нижние участки определения мутности воды были выделены на

удалении от морского края дельты для того, чтобы избежать влияния абразионных процессов. Для расчета относительного изменения концентрации взвеси в воде ( $\Delta S$ , %) использовалось отношение:

$$\Delta S = \Delta S_0 / S_1.$$

По выделенным участкам в пределах четырех рукавов устанавливалось среднее значение мутности  $\Delta S$ , далее проводилась оценка баланса взвешенных наносов в них на основе сопоставления рассчитанной величины с расходом воды в р. Лена выше дельты (по г/п Кюсюр) и температурами воздуха на метеостанции п. Тикси. Они соответствовали следующим неравенствам:  $\Delta S > 0$ ,

**Таблица 1.** Осредненные значения баланса взвешенных наносов по длине главных рукавов дельты р. Лена

Название протоки	$\Delta S_{\text{ср}}$	$\Delta S_{\text{макс}}$	$\Delta S_{\text{мин}}$	Число изученных ситуаций		
				$\Delta S > 0$	$\Delta S < 0$	всего
Быковская протока	3.4	34.0	-37.1	11	5	16
Трофимовская протока	9.4	40.8	-38.4	12	4	16
Туматская протока	-7.3	32.7	-25.6	2	8	10
Оленекская протока	-5.8	27.7	-21.8	1	7	8

$\Delta S < 0$  и  $\Delta S = 0$ , которые указывают на положительный, то есть продольное увеличение мутности (преобладание эрозии), отрицательный (преобладание аккумуляции) и равновесный баланс взвешенных наносов соответственно. В качестве источника метеорологических данных с 2000 по 2019 г. использовался архив Государственного фонда данных о состоянии природной среды, который включает в себя максимальные, минимальные и среднесуточные температуры воздуха, а также данные о количестве осадков (aisori.meteo.ru/waisori/). Для характеристики водности р. Лена использовались архивные данные о суточных расходах воды с 1999 по 2019 г. по г/п Кюсюр, расположенного в 120 км выше по течению от дельты (arcticgreativers.org).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ снимков был направлен на выявление процессов аккумуляции или эрозии в Быковской, Трофимовской, Туматской и Оленекской протоках за период открытой воды, то есть с июня по октябрь. Данный промежуток охватывает только период средней и пониженной водности (менее  $100000 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Наибольшая разница в балансе взвешенных наносов  $\Delta S$  наблюдается между правыми (Быковская и Трофимовская) и левыми (Туматская и Оленекская) протоками (табл. 1). В Быковской и Трофимовской преобладают ситуации продольного увеличения мутности воды  $\Delta S > 0$ . Если в сумме на обе протоки положительных балансов взвешенных веществ выявлено 33 случая, то отрицательных в 3.5 раза меньше – 9 случаев. В левых протоках (Туматская и Оленекская) на протяжении всего периода измерений преобладают процессы аккумуляции. На 15 случаев продольного уменьшения мутности выявлено всего лишь 3 случая повышения мутности по длине проток, последние случаи приурочены к максимальным расходам воды.

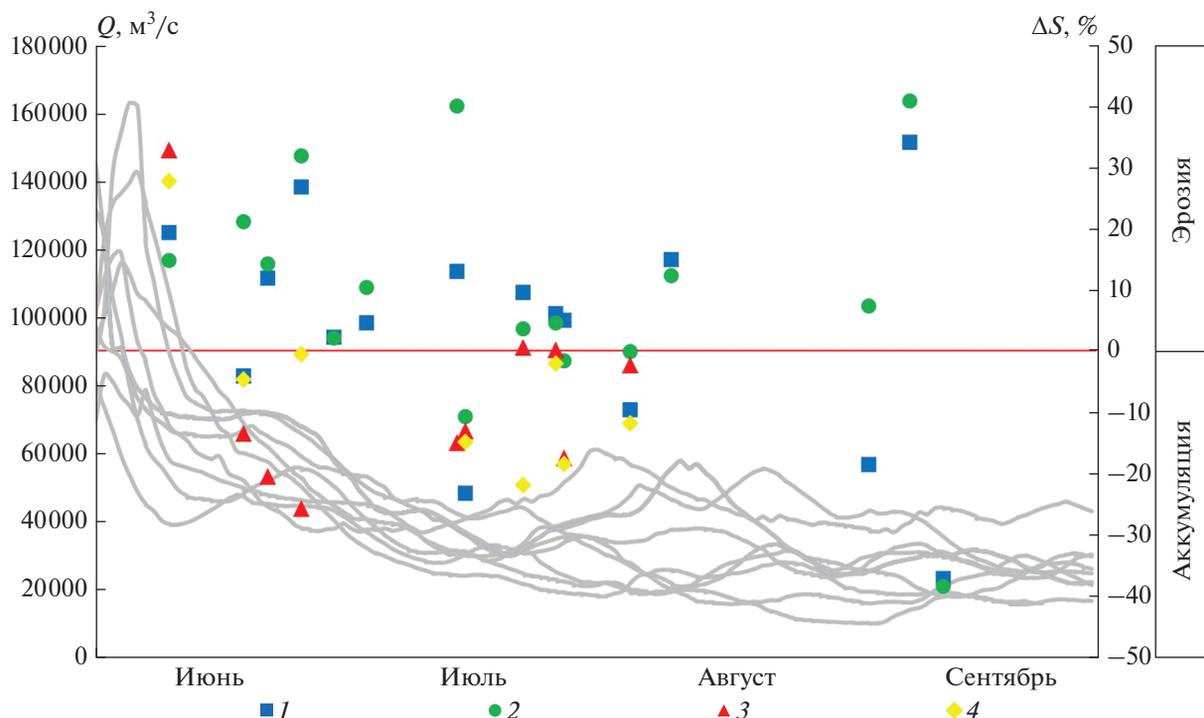
Для оценки гидрологических факторов этих отличий анализировались связи баланса взвешенных наносов и расходов воды (рис. 2). Для всего периода исследования наблюдается преобладание положительного баланса взвешенных наносов, то есть продольное увеличение расходов наносов, при разных интервалах расходов воды в разные периоды водности. Какая-либо сезонная закономерность изменения величины  $\Delta S$  не прослеживается. Процессы эрозии доминируют в Быковской и Трофимов-

ской в течение всего периода открытой воды, вне зависимости от расходов воды. В меньших по размеру и более длинных протоках центральной и левой части дельты (Туматская и Оленекская) преобладают аккумулятивные процессы. Здесь эрозионные явления наблюдались только для ситуаций прохождения пика половодья (например, баланс в Туматской и Оленекской протоках 10 июня 2018 г. при  $Q = 68000 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t = 12.0^\circ\text{C}$ ). Таким образом, в отличие от дельт южных рек (Чалов и др., 2017; Чалов и др., 2019) в анализируемом диапазоне расходов воды водность не является определяющим фактором формирования величины баланса взвешенных наносов  $\Delta S$ .

Отдельно был проанализирован режим эрозионно-аккумулятивных процессов в разных рукавах. В Трофимовской протоке концентрации взвешенных веществ, определенные по спутниковым снимкам, изменяются в диапазоне от 13 до 34 мг/л. По длине рукава отмечается сильная вариация значений – от вершины русла до морского края дельты. Как правило, в районе морского побережья значения мутности начинают снижаться из-за воздействия подпорных явлений от морской акватории и непосредственно положения границы речных и морских вод (рис. 3, а). В пределах придельтового участка, то есть до первого ответвления русла, наблюдаются небольшие колебания мутности, значения которых увеличиваются в верхней части дельты.

Единичные ситуации продольного снижения мутности воды по длине Трофимовской и Быковской проток (рис. 3, б) характеризуются плавным снижением мутности воды в верхней части дельты и приурочены в основном к холодным погодным условиям. Так, при  $Q = 21400 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t = 0.5^\circ\text{C}$  в Быковской протоке средние концентрации мутности составили 19.3 мг/л и уменьшались от 29 до 17 мг/л. Все случаи продольного уменьшения мутности воды в правых протоках наблюдались в период выпадения осадков при сплошной облачности.

Эти факты указывают на возможную роль в балансе наносов термодинамических процессов. Наиболее вероятной причиной этого является развитие разрушения берегов, вызванного установившимися в летний период положительными температурами и таянием многолетнемерзлых пород (Victorov, Trapeznikova, 2019; Суходровский, 1979), что отчетливо дешифрируется на снимках, сделанных в дни с высокими положительными температурами. В тече-



**Рис. 2.** Сезонные изменения баланса взвешенных наносов ( $\Delta S$ , %) в пределах руслового сектора дельты для: 1 – Быковской протоки, 2 – Трофимовской протоки, 3 – Туматской протоки, 4 – Оленекской протоки. Линиями показаны ежедневные расходы р. Лена (г/п Кюсюр) за исследуемый период 2000–2019 гг.

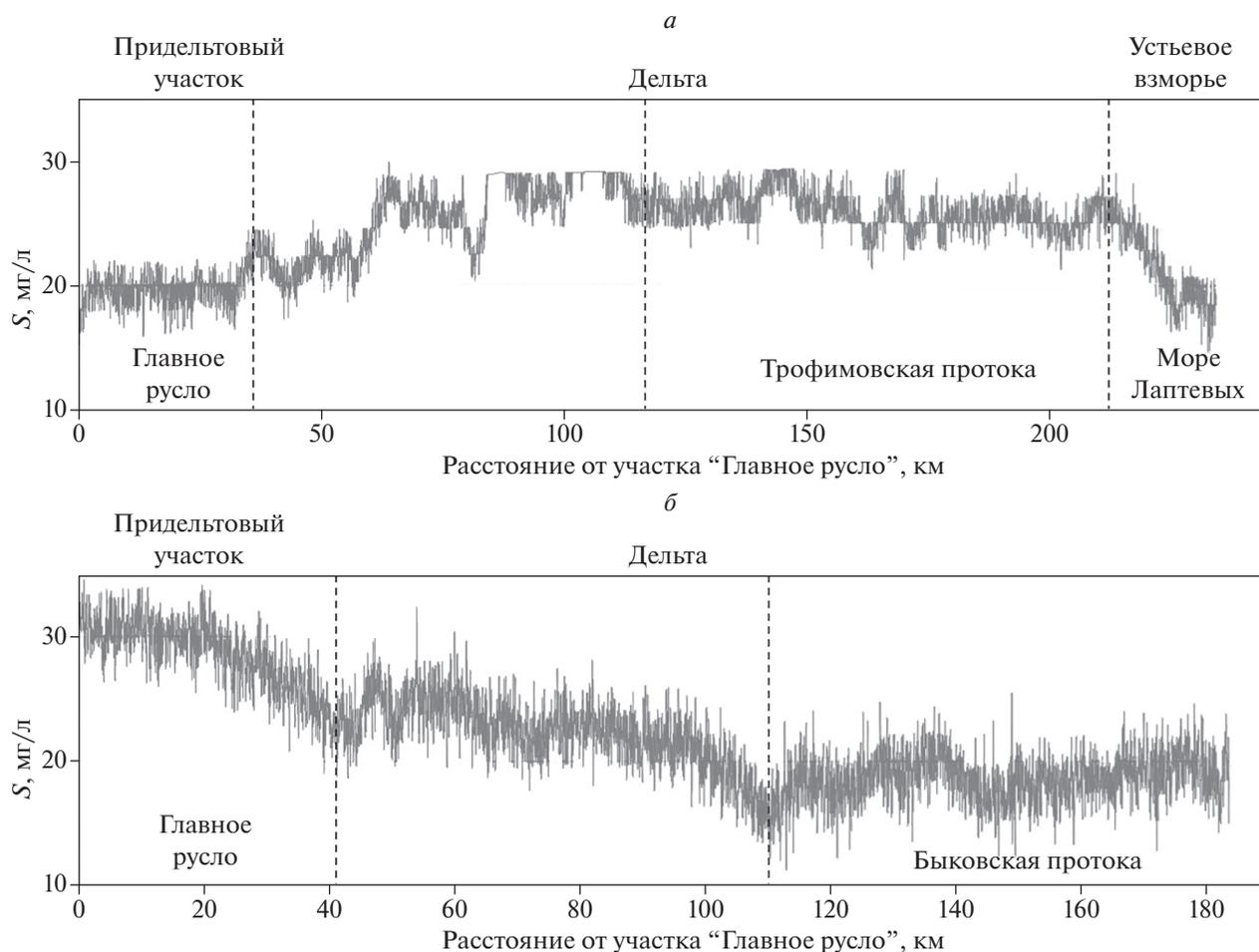
ние всего теплого периода года на участке Быковской протоки, имеющей субширотное положение (рис. 4), прослеживаются ситуации с преимущественным увеличением мутности воды вдоль левого берега южной экспозиции. Такое распределение мутности характерно для рек криолитозоны (Дебольский и др., 2018) и связано с медленным таянием многолетнемерзлых пород и отступанием берегов (Григорьев, 1993).

Процессы термоденудации и термоэрозии вызывают повышение мутности на 10–15 мг/л вдоль левого берега южной экспозиции. У правых берегов северной экспозиции, менее подверженных прямой солнечной радиации, эти процессы прослеживаются слабее (см. рис. 4). Была проанализирована связь между среднесуточными температурами воздуха по метеостанции Тикси и балансом взвешенных наносов  $\Delta S$  по длине разных рукавов (рис. 5).

С возрастанием среднесуточных температур воздуха от 5 до 14°C увеличивается влияние температуры воздуха на баланс взвешенных наносов. В Быковской и Трофимовской протоках уже при среднесуточных температурах воздуха более 5°C наблюдается продольное увеличение мутности воды за счет активизации размывов берегов. Сделан вывод, что влияние положительного притока суммарной солнечной радиации и повышение температуры воздуха способствуют деградации многолетнемерзлых пород и активизации процессов термоэрозии и термоденудации (Rachold et al., 2000). Оттаявшие ча-

стицы, находящиеся в мерзлоте, попадают в русло, повышая тем самым концентрацию твердого стока в верхнем слое речных вод. Несмотря на невысокие значения коэффициентов детерминации ( $R^2 < 0.5$ ), полученные результаты (см. рис. 5) достоверно характеризуют тенденции зависимости баланса наносов в правых протоках от температуры воздуха. Неустойчивость связи объясняется многофакторностью процесса формирования стока наносов, в частности влиянием массообмена в системе потокдно. Вывод о роли криогенных процессов в балансе наносов подтверждается сведениями, приведенными по результатам исследования эрозионных процессов со спутника TerraSAR-X (Stettner et al., 2017), указывающим на влияние температур и количества осадков на интенсивность и скорость эрозии.

Противоположная ситуация – преобладание аккумулятивных процессов в левых протоках – объясняется снижением здесь скоростей и уклонов. Оленекская и Туматская протоки находятся на этапе отмирания и характеризуются относительно небольшими глубинами и неширокими рукавами. Именно в этих протоках наблюдается наибольшее число неглубоких и нешироких ответвлений, теряющих водообмен с ближайшими протоками при установлении меженных уровней (Большаянов и др., 2013). Оленекская протока получает около 7% от общего стока р. Лена в половодье за счет стока из Булкурской протоки. В межень Булкурская протока теряет свою значимую роль в жизни Оленекской, и по-



**Рис. 3.** Продольный профиль мутности воды через: *a* – Трофимовскую протоку при  $Q = 66000 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t = 5.7^\circ\text{C}$  (по данным дешифрирования снимка Landsat 5 от 26 июля 2009 г.) и *б* – Быковскую протоку при  $Q = 21400 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t = 0.5^\circ\text{C}$  (по данным дешифрирования снимка Landsat 7 от 12 сентября 2002 г.).

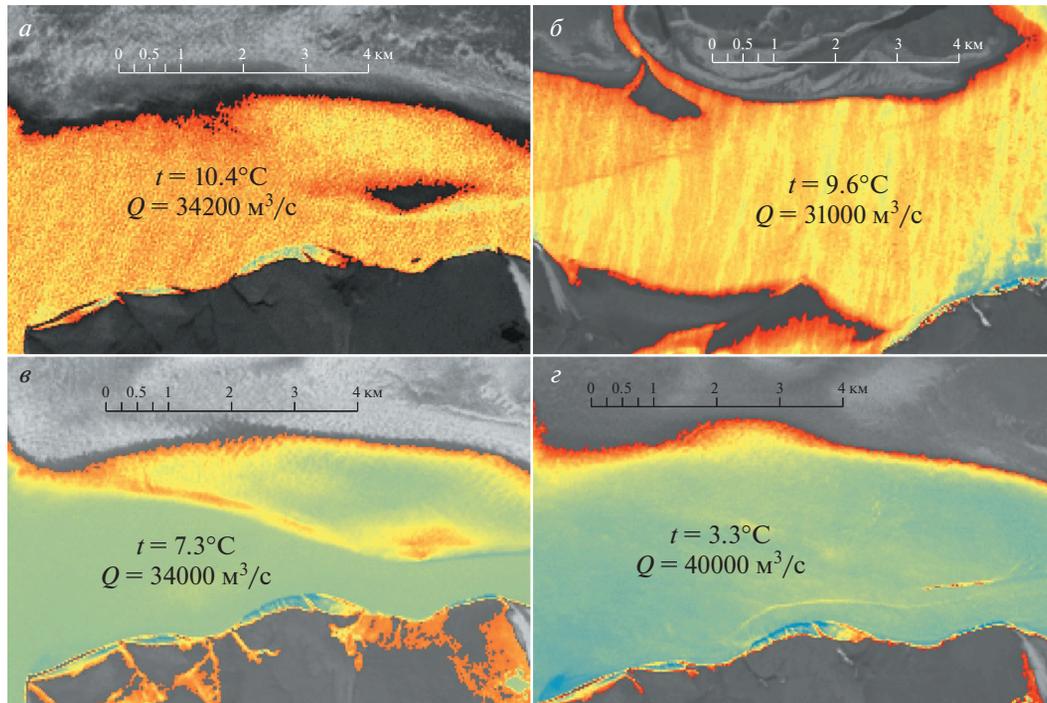
следняя, в свою очередь, получает стока еще меньше. При этом в обеих протоках также прослеживается зависимость величины  $\Delta S$  от температуры воздуха, однако в пределах в основном отрицательного диапазона значений  $\Delta S$ . Влияние криогенных процессов накладывается, таким образом, на гидродинамические факторы осаждения наносов, что приводит к постепенному ослаблению аккумуляции за счет поступления наносов от разрушаемых грунтов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности технологии дистанционного определения мутности воды для дельтовых областей. Из-за невозможности охвата регулярными гидрометрическими наблюдениями обширного пространства дельты с большим числом водотоков дистанционные методы являются безальтернативными для детального исследования изменчивости баланса наносов в них (Chalov et al., 2017). Следует отметить, что выполненные оценки имеют ряд ограничений. В частности, резуль-

таты охватывают только период средней и низкой водности в связи с тем, что при максимальном стоке активизация ледовых явлений не позволяет использовать методику дистанционного определения мутности воды. Тем не менее, применение данных дистанционного зондирования и разработанных методик по их дешифрированию дает возможность впервые комплексно оценить дельту р. Лена с точки зрения баланса потоков вещества в ней. В перспективе эти методы также позволят подойти к количественной оценке термоабразионных процессов в пределах морского края дельты, проявляющихся часто в многократном увеличении мутности воды (рис. 6) и соотношения вклада различных термодинамических процессов в материковый сток.

Расчет баланса взвешенных наносов с привлечением данных о концентрации взвешенных наносов за 2000–2019 гг., полученных по снимкам Landsat, позволил впервые получить количественные данные о взаимосвязи криогенных и



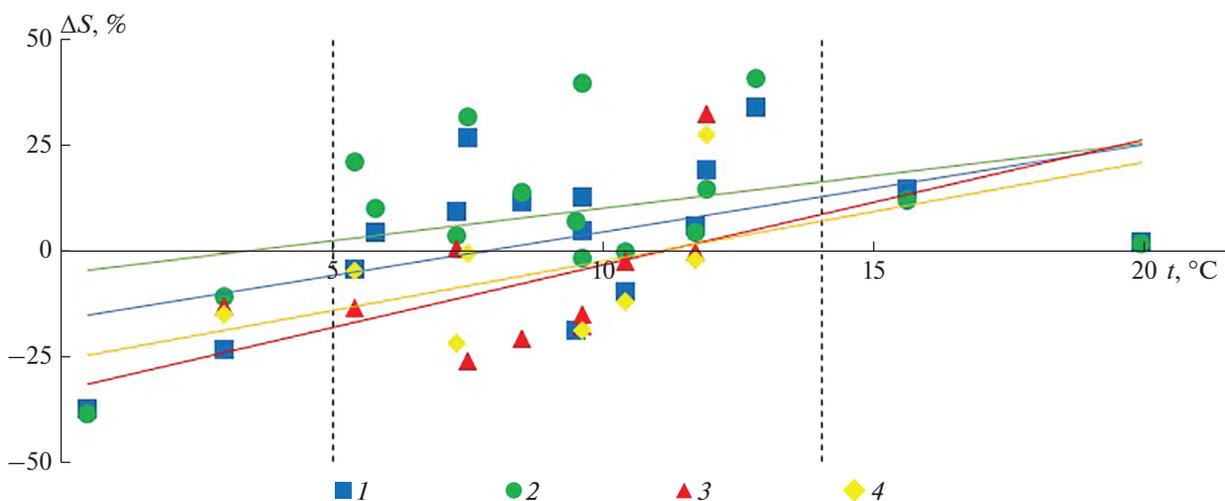
**Рис. 4.** Формирование шлейфов мутности за счет разрушения берегов Быковской протоки *a* – 5 августа 2000 г., *б* – 15 июля 2019 г., *в* – 23 июля 2013 г., *г* – 28 июня 2018 г.

эрозионно-аккумулятивных процессов в дельте р. Лена:

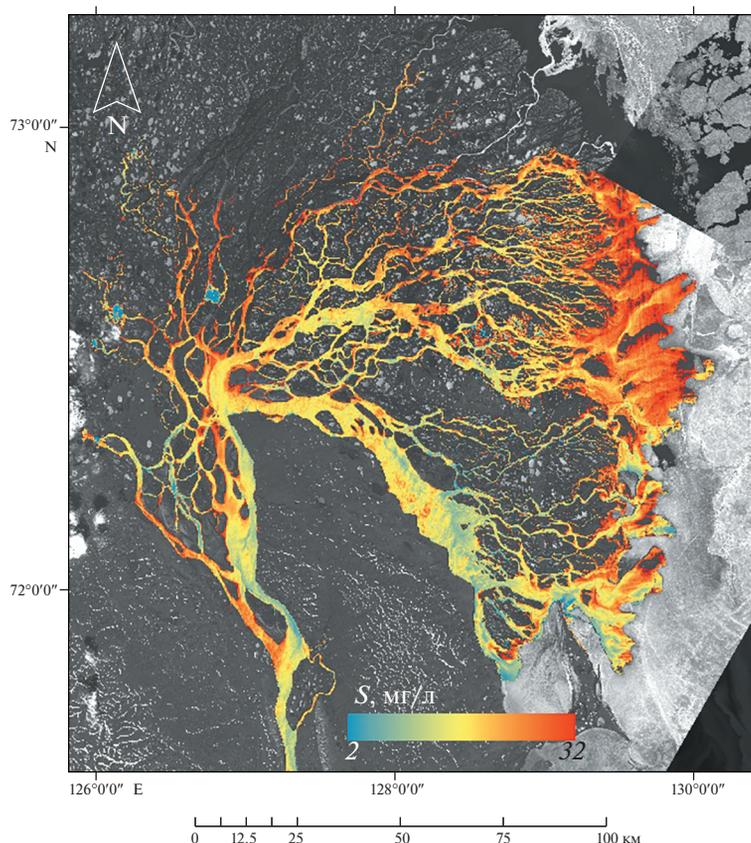
1. Выявлены контрастные балансы взвешенных наносов в левых и правых протоках дельты Лены при средних и меженных расходах воды. В активизирующихся протоках – Быковской и Трофимовской – наблюдается продольное увеличение мутности воды. В большинстве случаев происходит увеличение мутности по длине про-

ток. Отмирающие правые протоки (Туматская и Оленекская) характеризуются преобладанием процессов аккумуляции. Во многих случаях здесь наблюдается продольное снижение мутности воды.

2. Дан анализ причин формирования баланса взвешенных наносов в летне-осенний период. На баланс взвешенных наносов правых протоков влияют процессы термоденудации и термоэрозии берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами. Раз-



**Рис. 5.** Изменения баланса взвешенных наносов ( $\Delta S, \%$ , профили на рис. 1) в пределах руслового сектора дельты в зависимости от среднесуточных температур воздуха (по метеостанции п. Тикси) для: 1 – Быковской протоки, 2 – Трофимовской протоки, 3 – Туматской протоки, 4 – Оленекской протоки.



**Рис. 6.** Распределение мутности воды в приповерхностном слое в центральной части дельты Лены и характерная зона увеличения мутности в районе морского края дельты (снимок Landsat 8, дата съемки 15 июня 2019 г.,  $Q = 31200 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t = 9,6^\circ\text{C}$ ).

рушение берегов приводит к формированию мутьевых потоков и выносу большого количества взвешенных наносов, определяющих положительный баланс взвешенного вещества. В левых протоках повышение мутности наблюдается на спаде половодья, связанное с условиями смыва с прирусловой поймы и осередков в период снеготаяния и при их затоплении. Доминирование отрицательного баланса в левых протоках связано с уменьшением стока в Туматскую и Оленекскую протоки.

3. Выявлена роль погодных условий в формировании баланса наносов в дельте Лены. Влияние положительного притока суммарной солнечной радиации и повышение температур воздуха способствует деградации многолетнемерзлых пород и активизации процессов термоэрозии и термоденудации, во время которых оттаявшие частицы, находящиеся в мерзлоте, попадают в русло, повышая тем самым концентрацию твердого стока в верхнем слое речных вод.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Анализ космических снимков выполнен в рамках гранта РФФ 21-17-00181, анализ морфодинамики русла

и размывов берегов — при поддержке проекта РФФ 18-17-00086. Полевые работы выполнены при поддержке РФФИ 18-05-60219 Арктика.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большаинов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г.* Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: ААНИИ, 2013. 268 с.
- Григорьев М.Н.* Криоморфогенез устьевой области р. Лены. Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН, 1993. 176 с.
- Григорьев М.Н., Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Куницкий В.В., Ларионов А.Г., Мухоменов К.И., Скрабин Р.М., Тимиршин К.В.* Геология, сейсмичность и мерзлотные процессы арктических районов Западной Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1996. 86 с.
- Дебольский В.К., Грицук И.И., Ионов Д.Н., Масликова О.Я.* Размытие мерзлых берегов северных рек в зависимости от направления берегового уклона // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 9. С. 1112–1124.
- 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 Моск. ун-та. 1990. С. 120–144.
- Котляков В.М., Осокин Н.И., Сосновский А.В.* Динамика сезонно-талого слоя на Шпицбергене и Антаркти-

- ческом полуострове в XXI в. по результатам моделирования // Лед и Снег. 2020. Т. 60. № 2. С. 201–212.  
<https://doi.org/10.31857/S2076673420020034>
- Кравцова В.И., Антонова С.Ю.* Применение многозональной съемки для изучения и картографирования мелководий (на примере северо-восточного Каспия) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1974. № 2. С. 78–88.
- Кравцова В.И., Инюшин А.Н.* Исследование современной динамики дельты Лены по космическим снимкам // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. №6. С. 567–574.  
<https://doi.org/10.31857/S0321-0596466567-574>
- Лабутина И.А., Сафьянов Г.А., Шарлай Т.Г.* Исследование распространения взвесей в море по многозональным аэрофотоснимкам // Докл. АН.. 1976. Т. 230. № 2. С. 536–538
- Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
- Лопатин Г.В., Федоров М.К.* Физико-географический очерк дельты р. Лены. Л.: АНИИ, 1947–1948. 320 с.
- Суходровский В.Л.* Экзогенное рельефообразование в криолитозоне. М.: Наука, 1979. 280 с.
- Тарасов М. К., Тутубалина О. В.* Методика определения мутности воды в р. Селенге и прилегающей акватории оз. Байкал по данным дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 1. С. 60–71.  
<https://doi.org/10.7868/S020596141801-0017>
- Федорова И.В., Большианов 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 Моск. ун-та, 2009. С. 278–291.
- Чалов С.Р., Базилова В.О., Тарасов М.К.* Баланс взвешенных наносов в дельте Селенги в конце XX–начале XXI века: моделирование по данным снимков Landsat // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 3. С. 332–339.  
<https://doi.org/10.7868/S0321059617030075>
- Чалов С.Р., Потемкина Т.Г., Пашкина М.П., Касимов Н.С.* Многолетние изменения баланса взвешенных наносов в дельтах притоков Байкала // Метеорология и гидрология. 2019. Т. 44. № 10. С. 667–673
- Чаркин А.Н., Федорова И.В., Семилетов И.П.* Масштабы пространственной изменчивости распределения взвеси в системе “Река Лена–море Лаптевых” // Геология, география и экология океана. Ростов-на-Дону: ЮНЦ, 2009. С. 351–354.
- Электронный ресурс <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>  
 Электронный ресурс <https://arcticgreativers.org/>
- Albanakis K.S.* Testing of a model for the simulation of the volume reflectance of water due to suspended sediment under controlled conditions, for various sediment types // International J. Remote Sensing. 1990. V. 11. № 9. P. 1533–1547.  
<https://doi.org/10.1080/01431169008955112>
- Andreev A., Tarasov P., Schwamborn G., Ilyashuk B., Ilyashuk E., Bobrov A., Hubberten H.-W.* Holocene paleoenvironmental records from Nikolay Lake, Lena River Delta, Arctic Russia // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2004. V. 209. № 1–4. P. 197–217.  
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.010>
- Bhargava D.S., Mariam D.W.* Light penetration depth, turbidity and reflectance related relationship and models // ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing. 1991. V. 46. № 4. P. 217–230.  
[https://doi.org/10.1016/0924-2716\(91\)90055-z](https://doi.org/10.1016/0924-2716(91)90055-z)
- Chalov S.R., Bazilova V.O., Tarasov M.K.* Modelling suspended sediment distribution in the Selenga river delta using Landsat data // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 2017. V. 375. P. 19–22.  
<https://doi.org/10.5194/piahs-375-19-2017>
- Chalov S., Golosov V., Tsyplenkov A., Theuring P., Zakerinejad R., Märker M., Samokhin M. A.* Toolbox for sediment budget research in small catchments // Geography, environment, sustainability. 2017. V. 10 № 4. P. 43–68.  
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-4-43-68>
- Chalov S.R., Moreido V.M., Sharapova E.O., Efimova L.E., Efimov V.A., Lychagin M.Y., Kasimov N.S.* Hydrodynamic controls of particulate metals partitioning along the lower Selenga River — Main Tributary of The Lake Baikal // Water. 2020. V. 12. № 1345. P. 1–17.  
<https://doi.org/10.3390/w12051345>
- Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P.* A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters // International J. Remote Sensing. 2002. V. 23. № 23. P. 5079–5085.  
<https://doi.org/10.1080/0143116021000009912>
- Forget P., Ouillon S., Lahet F., Broche P.* Inversion of Reflectance Spectra of Nonchlorophyllous Turbid Coastal Waters // Remote Sensing of Environment. 1999. V. 68. № 3. P. 264–272.  
[https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(98\)00117-5](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(98)00117-5)
- Gavrilov A.V., Pizhankova E.I.* Dynamics of permafrost in the coastal zone of Eastern-Asian sector of the Arctic // Geography, Environment, Sustainability. 2018. V. 11. № 1. P. 20–37. doi.org/  
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-20-37>
- Kirk J.T.O.* The upwelling light stream in natural waters // Limnol. Oceanogr. 1989. V. 34. № 8. P. 1410–1425.
- Long C.M., Pavelsky T.M.* Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 129. P. 197–209.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.019>
- Miller R.L., Cruise J.F.* Effects of suspended sediments on coral growth: Evidence from remote sensing and hydrologic modeling // Remote Sensing of Environment. 1995. V. 53. № 3. P. 177–187.  
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00081-b](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00081-b)
- Milliman J.D., Farnsworth K.L.* River discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis // Cambridge Univ. Press. 2013. V. 24. № 4. P. 143–160.
- Novo E.M.M., Hansom J.D., Curran P.J.* The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration // International J. Remote Sensing. 1989. V. 10. № 7. P. 1283–1289.  
<https://doi.org/10.1080/01431168908903967>
- Park E., Latrubesse E.M.* Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 147. P. 232–242.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.013>
- Pavelsky T.M., Smith L.C.* Remote sensing of suspended sediment concentration, flow velocity, and lake recharge in the Peace-Athabasca Delta, Canada // WatWater Resour. Res. 2009. V. 45. № 11. P. 110–126.  
<https://doi.org/10.1029/2008wr007424>
- Rachold V., Grigoriev M.N., Are F.E., 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. № 3. P. 450–460.

<https://doi.org/10.1007/s005310000113>

Stettner S., Beamish A., Bartsch A., Heim B., Grosse G., Roth A., Lantuit H. Monitoring Inter- and Intra-Seasonal Dynamics of Rapidly Degrading Ice-Rich Permafrost Riverbanks in the Lena Delta with TerraSAR-X Time Series // *Remote Sensing*. 2017. V. 10. № 2. P. 51.

<https://doi.org/10.3390/rs10010051>

Victorov A.S., Trapeznikova O.N. Stochastic models of dynamic balance state for the morphological patterns of cryolithozone landscapes // *Geography, Environment, Sustainability*. 2019. V. 12. № 3. P. 6–15.

<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-68>

Wang J., Lu X.X., Liew S.C., Zhou Y. Retrieval of suspended sediment concentrations in large turbid rivers using Landsat ETM+: an example from the Yangtze River, China // *Earth Surf. Processes Landforms*. 2009. V. 34. № 8. P. 1082–1092.

<https://doi.org/10.1002/esp.1795>

Wang J., Lu X., Zhou Y. Retrieval of suspended sediment concentrations in the turbid water of the Upper Yangtze River using Landsat ETM+ // *Chin. Sci. Bull.* 2007. V. 52. № 2. P. 273–280.

<https://doi.org/10.1007/s11434-007-7012-6>

## Assessment Suspended Sediment Budget of the Lena River Delta Based on the Remote Sensing Dataset

S. R. Chalov<sup>1</sup> and K. N. Prokop'eva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

This study evaluates long-term and seasonal changes of sediment budget in Lena delta based on remote sensing dataset. Since 2000 Landsat images have been applying during ice-free period, from June to September. The sediment concentration at the delta topset was compared with sediment concentrations data at the outlets of: the Main, the Oleneskaya, the Tumatskyaya, the Trofimovskaya and the Bykovskaya channels to calculate suspended sediment budget in delta. The sediment concentration was calculated based on the archive Landsat images (more than 30 images). We have estimated influence of air temperature on thermal coastal erosion and the accumulation of sediments in the river Lena's delta. The increase of the daily average air temperature from 5 to 14°C plays critical role in the degradation of permafrost and the activation of the processes of thermal erosion and thermal denudation of the right channels coasts and this fact means that these results can help to estimate special aspects of biochemical balance of the delta.

**Keywords:** Lena River delta, sediment budget, remote sensing dataset, satellite imagery, Landsat, thermal erosion, thermal denudation, permafrost.

### REFERENCES

Albanakis K.S. Testing of a model for the simulation of the volume reflectance of water due to suspended sediment under controlled conditions, for various sediment types // *International J. Remote Sensing*. 1990. V. 11. № 9. P. 1533–1547. DOI: 10.1080/01431169008955112

Andreev A., Tarasov P., Schwamborn G., Ilyashuk B., Ilyashuk E., Bobrov A., Hubberten H.-W. Holocene paleoenvironmental records from Nikolay Lake, Lena River Delta, Arctic Russia // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2004. V. 209. № 1–4. P. 197–217. DOI: 10.1016/j.palaeo.2004.02.010

Bhargava D.S., Mariam D.W. Light penetration depth, turbidity and reflectance related relationship and models // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1991. V. 46. № 4. P. 217–230. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-10-4-43-68

Bol'shijanov D.Ju., Makarov A.S., Shnajder V., Shtof G. Proishozhdenie i razvitie del'ty reki Leny [Origin and development of the Lena river delta] // Saint Petersburg: Arctic and Antarctic research Institute, 2013. P. 268 (In Russian).

Chalov S.R., Bazilova V.O., Tarasov M.K. Modelling suspended sediment distribution in the Selenga river delta using Landsat data // *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. 2017. V. 375. P. 19–22. DOI: 10.5194/piahs-375-19-2017

Chalov S.R., Bazilova V.O., Tarasov M.K. Suspended sediment balance in Selenga delta at the late XX–early XXI century: Simulation by Landsat satellite images // *Vodnye re-*

*sursy*. 2017. V. 44. № 3. P. 332–339 (In Russian). DOI: 10.7868/S0321059617030075

Chalov S., Golosov V., Tsyplenkov A., Theuring P., Zakerinejad R., Märker M., Samokhin M. A toolbox for sediment budget research in small catchments // *Geography, environment, sustainability*. 2017. V. 10. № 4. P. 43–68. doi:10.24057/2071-9388-2017-10-4-43-68

Chalov S.R., Moreido V.M., Sharapova E.O., Efimova L.E., Efimov V.A., Lychagin M.Y., Kasimov N.S. Hydrodynamic Controls of Particulate Metals Partitioning Along the Lower Selenga River — Main Tributary of The Lake Baikal // *Water*. 2020. V. 12. № 1345. P. 1–17. DOI: 10.3390/w12051345

Chalov S.R., Potemkina T.G., Pashkina M.P., Kasimov N.S. Evolution of suspended sediment budget in the deltas of Lake Baikal tributaries // *Meteorologija i gidrologija*. 2019. V. 44. № 10. P. 667–673 (In Russian).

Charkin A.N., Fedorova I.V., Semiletov I.P. Scale of the spatial variability of the distribution of suspended sediment in the system “The Lena River–The Laptev Sea” // *Geologija, geografija i jekologija okeana* [Geology, geography and ecology of the ocean] Rostov-on-Don: Southern scientific center of the Russian Academy of Sciences. 2009. P. 351–354 (In Russian).

Digital source <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>

Digital source <https://arcticgreatrivers.org/>

Debol'skij V.K., Gricuk I.I., Ionov D.N., Maslikova O.Ja. Erosion of the frozen riversides of the northern rivers depending on the direction of the coastal slope // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2018. V. 13. № 9. P. 1112–1124 (In Russian).

- Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P.* A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters // *International J. Remote Sensing*. 2002. V. 23. № 23. P. 5079–5085. DOI: 10.1080/0143116021000009912
- Fedorova I.V., Bol'shijanov D.Ju., Makarov A.S., Tret'jakov M.V., Cheverova A.A.* Modern hydrological situation on the Lena river delta // *Sistema morja Laptevyyh i priliegajushhih morej Arktiki: sovremennoe sostojanie i istorija razvitiya* [System of the Laptev Sea and the Adjacent Arctic Seas: Modern and Past Environments]. Moscow: Moscow University Press, 2009. P. 278–291 (In Russian).
- Forget P., Ouillon S., Lahet F., Broche P.* Inversion of Reflectance Spectra of Nonchlorophyllous Turbid Coastal Waters // *Remote Sensing of Environment*. 1999. V. 68. № 3. P. 264–272. DOI: 10.1080/0143116021000009912
- Gavrilov A.V., Pizhankova E.I.* Dynamics of permafrost in the coastal zone of Eastern-Asian sector of the Arctic // *Geography, Environment, Sustainability*. 2018. V. 11. № 1. P. 20–37. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-20-37
- Grigor'ev M.N.* Kriomorfogenez ust'evoj oblasti r. Leny [Cryomorphogenesis on the Lena river delta] // *Yakutsk: Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*, 1993. P. 176. (In Russian).
- Grigor'ev M.N., Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M., Kunickij V.V., Larionov A.G., Mikulenko K.I., Skrjabin R.M., Timirshin K.V.* Geologija, sejsmichnost' i merzlotnye processy arkticheskikh rajonov Zapadnoj Yakutii [Geology, seismicity and permafrost processes of the Arctic regions of Western Yakutia] // *Yakutsk: Yakut scientific center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science*, 1996. P. 86 (In Russian).
- Korotaev V.N., Mihajlov V.N., Babich D.B., Bogomolov A.L., Zaec G.M.* Hydrological and morphological processes in the Lena river delta // *Zemel'nye i vodnye resursy: protivoperozionnaja zashhita i regulirovanie rusel* [Land and water resources: anti-erosion protection and regulation of riverbeds]. Moscow: Moscow University Press. 1990. P. 120–144 (In Russian).
- Kotljakov V.M., Osokin N.I., Sosnovskij A.V.* Dynamics of seasonally thawed layer on Svalbard and the Antarctic Peninsula in the XXI century according to modeling data // *Led i Sneg*. 2020. V. 60. № 2. P. 201–212 (In Russian). DOI: 10.31857/S2076673420020034
- Kravtsova V.I., Antonova S.Yu.* Applying polyzonal surveying to studying and mapping of shallows: case study of Northeastern Caspian Sea. // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geologija i razvedka*. 1974. V. 2. P. 78–88 (In Russian).
- Kravtsova V.I., Inyushin A.N.* Studying the present-day dynamics of Lena delta by space images // *Vodnye resursy*. 2019. V. 46. № 6. P. 567–574 (In Russian). DOI: 10.31857/S0321-0596466567-574
- Kirk J.T.O.* The Upwelling Light Stream in Natural Waters // *Limnology and Oceanography*. 1989. V. 34. № 8. P. 1410–1425.
- Labutina I.A., Saf'yanov G.A., Sharlai T.G.* Studying Suspended Sediment Transport in Seas by Polyzonal Images // *Doklady Akademii Nauk*. 1976. V. 230. № 2. P. 536–538 (In Russian).
- Lisitsyn A.P.* Marginal filters of oceans // *Okeanologiya*. 1994. V. 34. № 5. P. 735–747 (In Russian).
- Long C.M., Pavelsky T.M.* Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment // *Remote Sensing of Environment*. 2013. V. 129. P. 197–209. DOI: 10.1016/j.rse.2012.10.019
- Lopatin G.V., Fedorov M.K.* Fiziko-geograficheskij ocherk del'ty r. Leny [Physico-geographical sketch of the Lena river delta] // *Leningrad: Arctic research Institute*, 1947. P. 320 (In Russian).
- Miller R.L., Cruise J.F.* Effects of suspended sediments on coral growth: Evidence from remote sensing and hydrologic modeling // *Remote Sensing of Environment*. 1995. V. 53. № 3. P. 177–187. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00081-b
- Milliman J.D., Farnsworth K.L.* River Discharge to the Coastal Ocean // *A Global Synthesis*. Cambridge Univ. Press. 2013. V. 24. № 4. P. 143–160.
- Novo E.M.M., Hansom J.D., Curran P.J.* The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration // *International J. Remote Sensing*. 1989. V. 10. № 7. P. 1283–1289. DOI: 10.1080/01431168908903967
- Park E., Latrubesse E.M.* Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 147. P. 232–242. DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.013
- Pavelsky T.M., Smith L.C.* Remote sensing of suspended sediment concentration, flow velocity, and lake recharge in the Peace-Athabasca Delta, Canada // *Water Resour. Res.* 2009. V. 45. № 11. P. 110–126. DOI: 10.1029/2008wr007424
- Rachold V., Grigoriev M.N., Are F.E., 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. № 3. P. 450–460. DOI: 10.1007/s005310000113
- Stettner S., Beamish A., Bartsch A., Heim B., Grosse G., Roth A., Lantuit H.* Monitoring Inter- and Intra-Seasonal Dynamics of Rapidly Degrading Ice-Rich Permafrost Riverbanks in the Lena Delta with TerraSAR-X Time Series // *Remote Sensing*. 2017. V. 10. № 2. P. 51. DOI: 10.3390/rs10010051
- Suhodrovskij V.L.* Ekzogennoe rel'efoobrazovanie v kriolitozone [Exogenous relief formation in the cryolithozone] // *Moscow: Science*, 1979. 280 p. (In Russian).
- Tarasov M. K., Tutubalina O. V.* Water turbidity estimation in the Selenga River and nearby waters of Lake Baikal using remote sensing data // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2018. № 1. P. 60–71.
- Victorov A.S., Trapeznikova O.N.* Stochastic Models of dynamic balance state for the morphological patterns of cryolithozone landscapes // *Geography, Environment, Sustainability*. 2019. V. 12. № 3. P. 6–15. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-68
- Wang J., Lu X.X., Liew S.C., Zhou Y.* Retrieval of suspended sediment concentrations in large turbid rivers using Landsat ETM+: an example from the Yangtze River, China // *Earth Surf. Processes Landforms*. 2009. V. 34. № 8. P. 1082–1092. DOI: 10.1002/esp.1795
- Wang J., Lu X., Zhou Y.* Retrieval of suspended sediment concentrations in the turbid water of the Upper Yangtze River using Landsat ETM+ // *Chin. Sci. Bull.* 2007. V. 52. № 2. P. 273–280. DOI: 10.1007/s11434-007-7012-6