



## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЛАНОВЫХ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЙ В ДЕЛЬТЕ РЕКИ ЛЕНЫ

✉ Прокопьева К.Н.<sup>1</sup>, Конева У.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

✉ prokris3@mail.ru

Исследование посвящено анализу русловых переформирований в дельте реки Лены под влиянием деградации многолетнемерзлых пород (ММП) и климатических изменений. На основе дешифрирования спутниковых снимков за периоды 1964-2000 и 2000-2024 гг. установлено значительное увеличение скорости отступания берегов. Средняя скорость разрушения берегов выросла почти в два раза – с 1,55 м/год (1964–2000) до 2,57 м/год (2000–2024). Наибольшая интенсивность разрушений характерна для Трофимовской протоки, однако наиболее значительный рост скоростей отмечен в Туматской и в нижнем течении Быковской. Выявленная активизация эрозионных процессов обусловлена наблюдаемым в регионе повышением температуры воздуха и многолетнемерзлых пород. Для дальнейшего детального изучения процессов разрушения берегов в августе 2024 г. заложены стационары мониторинга положения береговой линии на о. Самойловский и о. Курунгнах. Результаты работы имеют ключевое значение для оценки стока взвешенных наносов в море Лаптевых.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, русловые переформирования, термоэрзия, Ледовый комплекс, дельта Лены, Арктика

**Введение.** Дельта реки Лена – крупнейшая в России и Арктике – представляет собой уникальную систему, отличающуюся особым геолого-геоморфологическим строением, историей формирования и сложной многорукавной структурой, включающей более 2000 рукавов и проток [Большинов и др., 2013; Гуков, 2001; Михайлов, 1997; Эстуарно-дельтовые системы..., 2007]. Основным и крупнейшим по водности рукавом дельты, является Трофимовская, образующая одноименную сеть многочисленных проток. На 25-м км от начала Трофимовской от нее отходит рукав Сардахская протока длиной 97 км. Вторая по водности и судоходная – Быковская протока. Центральный сектор дельты представлен сетью Туматских проток. На 10-м км от Туматской протоки отходит Арынская протока, которая присоединяется к Оленёкской протоке в нижнем течении. Западная часть дельты представлена самым длинным рукавом дельты – Оленёкской протокой, которая берет начало у о. Столб и тянется на 210 км до устьевого бара. На 15-м км в нее впадает протока Булкурская, играющая определяющую роль в водности Оленёкской протоки. В нижнем течении Оленёкская разделяется на два небольших водотока, левый из которых – Ангардамская протока. На этом участке, в 40 км от морского края дельты (МКД), в Оленёкский рукав впадает Арынская протока, которая берет свое начало в Туматском секторе дельты (рис. 1). На территории дельты распространены многолетнемерзлые породы (ММП), включая обнажения пород Ледового комплекса, играющие важную роль в региональных углеродных циклах [Strauss et al., 2017]. Сегодня устьевая область Лены выполняет важную хозяйственную и логистическую функцию, являясь стратегически важным элементом речного судоходства, имеющим выход к Северному морскому пути.

Дельта Лены представляет собой ключевую зону, где происходит трансформация литогеохимического потока, формирующегося в бассейне Лены и выносимого в акваторию моря Лаптевых и далее в Северный Ледовитый океан. Речной сток вносит значительные объемы пресной воды, взвешенных наносов, органического углерода, оказывая комплексное влияние на процессы, протекающие в арктических морях. Современные климатические изменения особенно ярко проявляются в арктическом

регионе [Росгидромет, 2022; Rantanen *et al.*, 2022], где они оказывают комплексное влияние на гидрологические и биогеохимические процессы. Значения тренда повышения температуры воздуха на территории дельты Лены по данным реанализа ERA5-Land составляет  $+0,95^{\circ}\text{C}/10$  лет (здесь и далее согласно коэффициенту корреляции Спирмена при уровне значимости  $p\text{-value} < 0,05$ ) за период с 1979 по 2024 гг. С 2000 г. интенсивность потепления возрастила и составила  $+1,32^{\circ}\text{C}/10$  лет (при  $p\text{-value} < 0,05$ ).

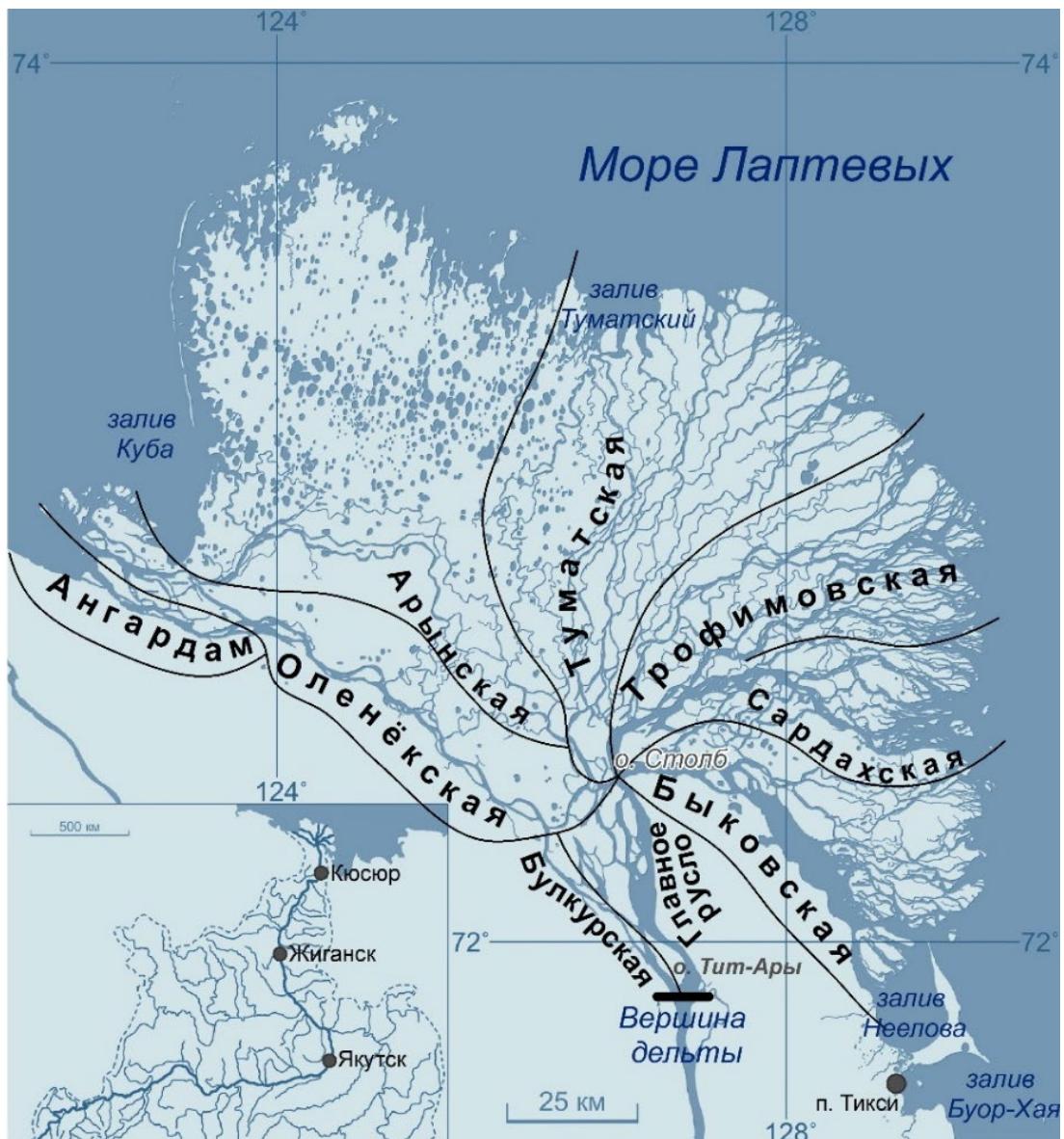


Рис. 1. Карта-схема дельты реки Лены с указанием основных рукавов и секторов

По данным термометрической скважины на о. Самойловский, наблюдения на которой велись с 2006 по 2021 гг., установлено статистически значимое (при  $p\text{-value} < 0,05$ ) увеличение температуры ММП на всех глубинах (рис. 2). Максимальные тренды характерны для верхних горизонтов ( $4,75^{\circ}\text{C}/10$  лет на 0,75 м). Значения декадных трендов равномерно уменьшаются по глубине и на отметке 26,75 м достигают значений  $1,00^{\circ}\text{C}/10$  лет. За исследуемый период среднегодовая температура по всему профилю в среднем увеличилась на  $3,25^{\circ}\text{C}$ , что составляет  $2,64^{\circ}\text{C}/10$  лет.

Анализ сезонных изменений в период открытой воды (июнь–сентябрь) демонстрирует общую значимую ( $p\text{-value} < 0,05$ ) тенденцию к повышению температуры ММП на всех горизонтах, причем более высокие значения наблюдались в 2021 г. Без учета данных за 2006 г. (измерения начались 20 августа), величина тренда на поверхности

составляет  $1,71^{\circ}\text{C}/10$  лет для периода 2007–2021 гг. Если на поверхности (глубина 0 м), наблюдаются флюктуации температуры (поверхностные горизонты более подвержены внутригодовым колебаниям температуры), то на глубинах 5 м и глубже наблюдается статистически ( $p\text{-value} < 0,05\%$ ) значимый многолетний рост температуры ММП и достигает максимума  $3,47^{\circ}\text{C}/10$  лет на глубине 6,75 м. На самом глубоком горизонте (26,75 м) скорости температурных изменений составляют  $1,11^{\circ}\text{C}/10$  лет.

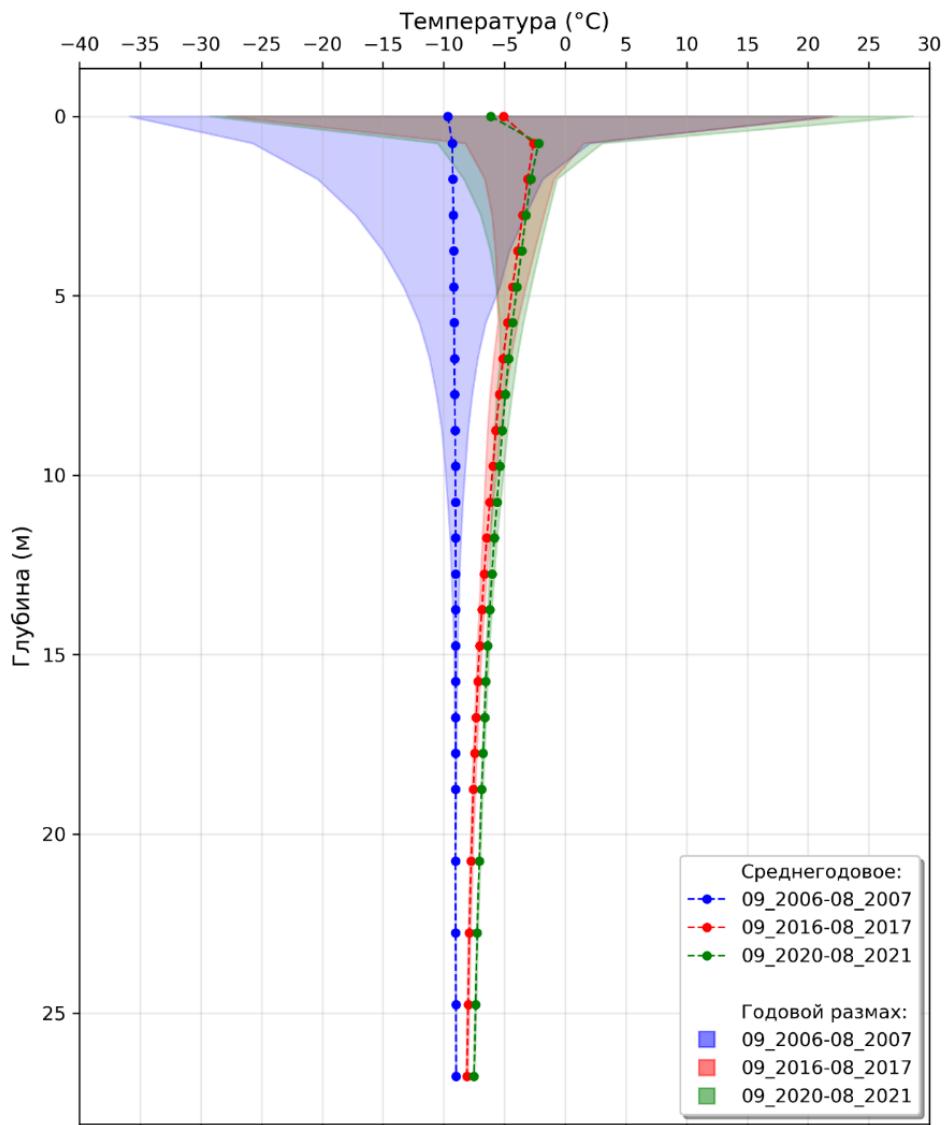


Рис. 2. Среднегодовые, максимальные и минимальные температуры ММП на разных глубинах в период с 2006 по 2017 г. по данным скважины на о. Самойловский [Boike *et al.*, 2019], с добавлением автором данных за период 2020–2021 гг.

Однако при интерпретации этих данных необходимо учитывать существенное локальное антропогенное воздействие. Как показано в работе [Большиянов и др., 2024] ежегодное снегонакопление у устья скважины является вероятной основной причиной столь высоких темпов роста температур в многолетнем разрезе. Данные независимой 66-метровой скважины, пробуренной в естественных условиях в том же регионе, фиксируют на сопоставимой глубине (26,75 м) существенно меньший тренд потепления – около  $0,06^{\circ}\text{C}/\text{год}$  (или  $0,6^{\circ}\text{C}/10$  лет) [Большиянов и др., 2024].

Таким образом, данные по скважине на о. Самойловский, хотя и отражают интенсивное увеличение температур ММП в точке наблюдений, могут не быть representative для фоновых природных условий дельты Лены из-за сильного локального антропогенного фактора. При этом полученные значения согласуются с

верхней границей диапазона трендов потепления ММП, наблюдавшихся в прибрежных районах Арктики по данным глобальной сети мониторинга (например, 0,19-0,59°C/10 лет по данным [AMAP, 2024]; ~0,4-0,6°C/10 лет в европейской части России и Западной Сибири по [Biskaborn et al., 2019; Romanovsky et al., 2019; Smith et al., 2023]).

В совокупности фиксируемые изменения температуры воздуха и ММП оказывают значительное влияние на развитие эрозионно-аккумулятивных процессов и развитие дельты Лены.

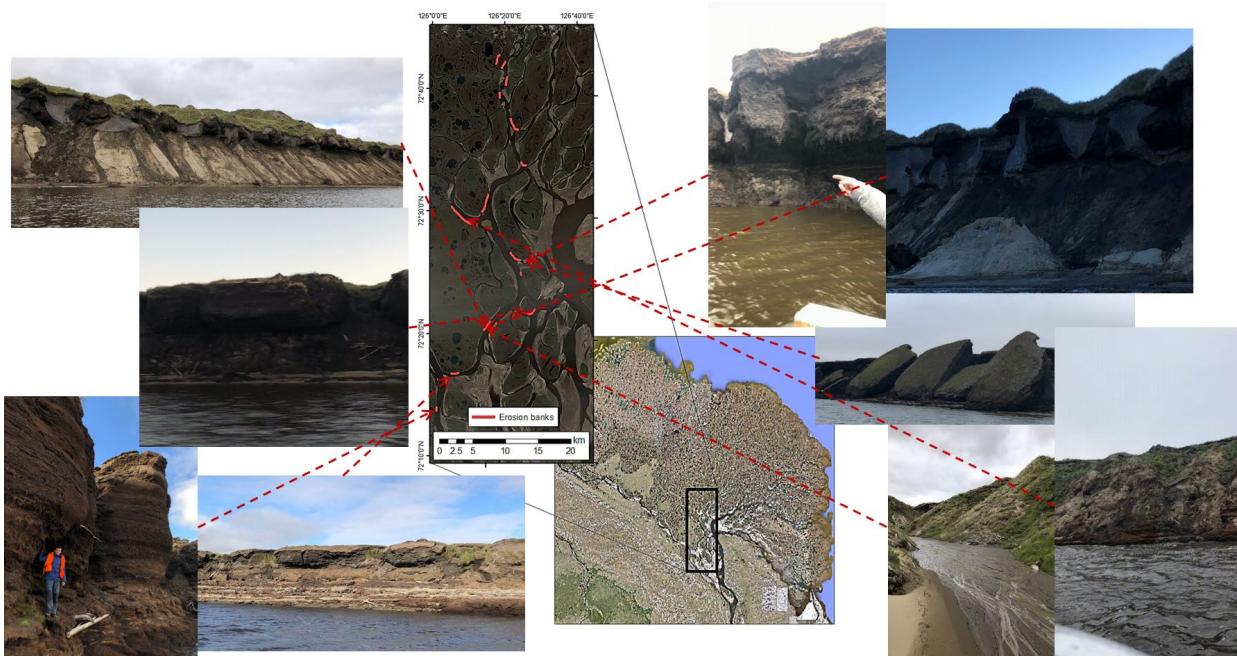


Рис. 3. Термоэрзационные берега дельты Лены (фото автора во время экспедиции в августе 2022 г.)

**Материалы и методы.** Режим плановых переформирований в дельте р. Лены изучался в ходе анализа темпов и интенсивности разрушения мерзлых берегов аллювиально-морской террасы (по [Григорьев, 1993]) являющихся 1-й надпойменной террасой, сложенной алевритом и песком, в разной степени обогащенными растительными остатками и поверхности 3-й надпойменной террасы, сложенной породами Ледового комплекса. Проанализированы сектора дельты от вершины у о. Тит-Ары до морского края (кроме Арынской протоки) (рис. 3). Из анализа исключены участки ежегодно затапливаемых пойменных массивов.

Определение границ островов аллювиально-морской террасы в секторах Быковской, Трофимовской, Туматской и Оленёкской проток и их смещения проводилось путем сопоставления серий спутниковых снимков: 1) KeyHole за 1964 год, 2) Landsat 7 за 2000 год, 3) Sentinel-2 за 2024 г. Дешифрирование проводилось как в режиме ручной оцифровки каждого острова (суммарно оцифровано около 23 600 км береговой линии) – для снимков KeyHole и Sentinel, так и методами автоматической обработки путем применения обучаемой классификации к спутниковым снимкам Landsat и Sentinel. В итоге, проанализировано два периода: 1964-2024 (снимки KeyHole и Sentinel в режиме ручной обработки) и 2000-2024 (снимки Landsat и Sentinel в режиме автоматической обработки). Однако сопоставить эти два метода не представляется возможным, поэтому дополнительно проведена ручная обработка 50 ключевых участков, на которых выделены границы островных массивов аллювиально-морской террасы за 1964, 2000 и 2024 г., что позволило провести оценку темпов и интенсивности разрушений за два сравниваемых периода: 1964-2000 (до начала климатических изменений) и 2000-2024 (период активных климатических изменений).

Анализ пространственных различий между секторами дельты проводился на основе регулярной сетки размером 5 км x 5 км, полученной путем построения русловой

сети. Внутри каждой ячейки проводились расчеты суммарного изменения площади эрозионных берегов за периоды 1964-2024 гг. и 2000-2024 гг.

**Результаты.** Общая площадь разрушений по результатам ручной оцифровки за период с 1964 по 2024 гг. (60 лет) на рассматриваемых участках составила 87,3 км<sup>2</sup>, то есть в год в среднем разрушению подвержено около 1,46 км<sup>2</sup> площади островов аллювиально-морской террасы (рис. 4). С учетом длины разрушенных участков, которая составляет 2 138 км, средняя скорость разрушений в дельте Лены за исследуемый период составила 0,68 м/год.

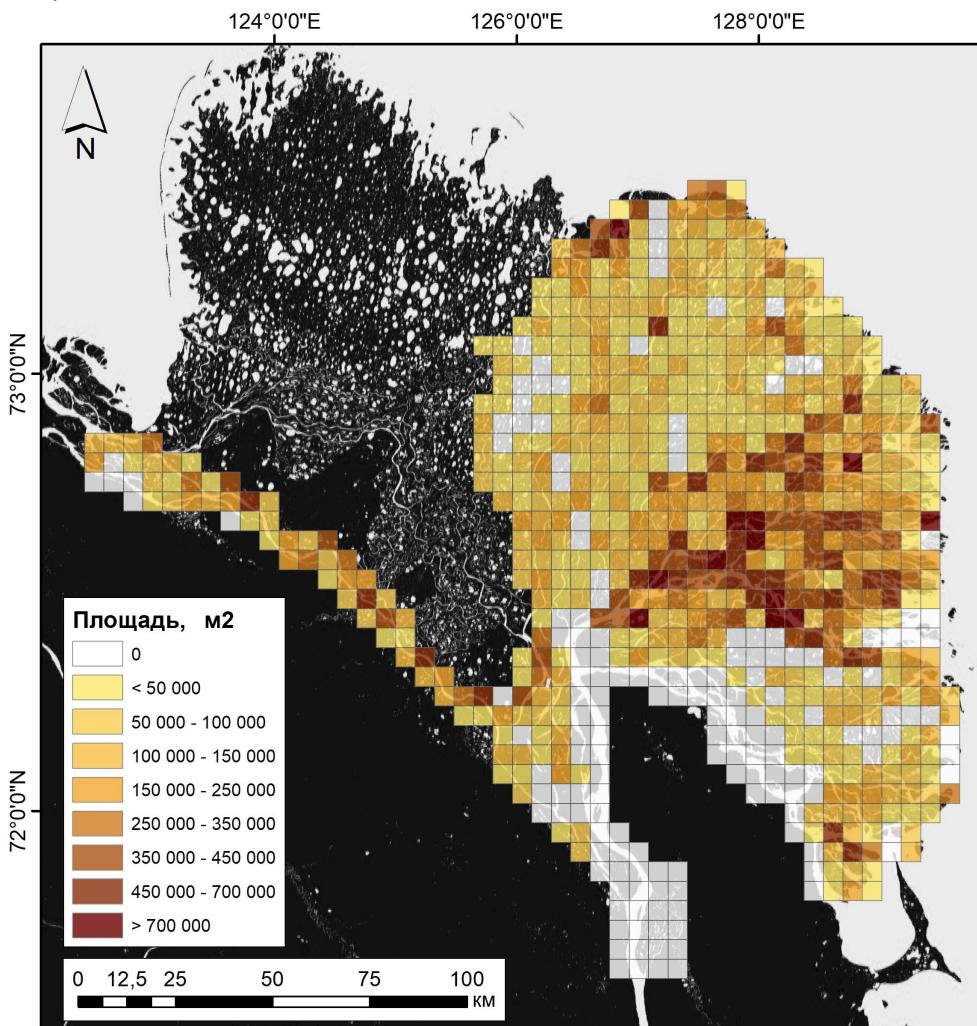


Рис. 4. Пространственное распределение суммы площадей разрушений в ячейках с 1964 по 2024 г.

Максимальные величины суммарной площади разрушения берегов, длины и скорости установлены в секторе Трофимовской протоки, где в среднем за 60 лет переформированием подверглось 49,6 км<sup>2</sup> площади островов, что составляет 57% от суммарной площади разрушений за 1964-2024 гг. Наибольшие скорости отступания берега отмечены вдоль основного многоводного рукава Трофимовской протоки, а также в районе выхода отложений Ледового комплекса на о. Собо-Сисё (до 15 м/год), расположенного в Сардахской протоке. Средняя за 60 лет скорость разрушения берегов составляет 0,88 м/год. Не менее активно разрушаются берега русла Туматской протоки, где за 60 лет изменениям подверглось свыше 22,9 км<sup>2</sup> (или 26% от суммарного значения для всех изучаемых участков). В этой части прослеживается тренд увеличения площадей при движении от вершиной части рукавов к морскому краю дельты, где активно развиваются термоабразионные процессы. Средняя интенсивность отступания составляет 0,55 м/год. Сравнение этих двух секторов показывает, что, в целом, при равной длине эрозионных берегов, подвергшихся разрушению, активнее разрушаются берега

Трофимовской протоки, что связано с распространением здесь пологих и сегментных излучин и скоростями течения за счет большой водности.

Значительно меньше величина суммарной площади эрозионных берегов в Оленёкской протоке – 9,37 км<sup>2</sup> (или 10,7%), но с учетом общей длины русловой сети этой протоки, пространственное распределение (отношение площади эрозионных берегов к общей длине русла), в среднем, соответствует значениям, наблюдаемым в Трофимовской протоке. Активизация горизонтальных переформирований здесь приурочена к излучинам разветвлено-извилистого русла. Максимальные скорости наблюдаются в вершинах излучин (преимущественно у левого берега) и достигают 5,3 м/год. Средняя скорость составляет 0,74 м/год.

Наименьшие значения площади разрушений установлены для сектора Быковской протоки – 4,14 км<sup>2</sup>. Особенностью Быковской протоки является полное отсутствие участков плановых переформирований вдоль основного рукава, что обусловлено геоморфологическим строением дельты – правый берег дельты представляет собой неразмываемый коренной берег Хараулахского хребта, а характерной чертой левобережной части Быковской протоки являются малые глубины, где размывающая способность потока минимальна. Также, Быковская протока является заполняющимся эстуарием в результате подъёма уровня моря [Коротаев, 1984]. Участки активных разрушений расположены в нижнем 30-километровом течении до впадения в залив Неёлова и в районе островов, примыкающих к Трофимовскому сектору. Разрушение этих берегов, в первую очередь, связано с абразионным воздействием со стороны моря. Средняя скорость плановых переформирований в нижней части Быковской протоки составляет 0,63 м/год.

Относительно стабильным является участок от вершины дельты (район острова Тит-Ары) до первого «основного» разветвления дельты у о. Столб. Здесь за 60-летний период разрушено около 0,91 км<sup>2</sup> со средней скоростью 0,2 м/год. Однако у левобережных аккумулятивных островов, приуроченных к потоку Главного русла, средняя скорость за 60 лет может достигать и 2 м/год.

Количественная характеристика разрушений берегов за период с 1964 по 2024 гг. представлена в **таблице 1**.

Табл. 1. Сравнительная характеристика эрозионных берегов за период с 1964 по 2024 гг.

Сектор дельты	Площадь разрушений (F), км <sup>2</sup>	Площадь в % от F	Скорость, км <sup>2</sup> /год	Длина эрозионных берегов, км	Скорость, м/год
Трофимовский	49.6	57.0	0.83	940	0.88
Быковский	4.14	4.76	0.07	110	0.63
Туматский	22.9	26.4	0.38	700	0.55
Оленёкский	9.37	10.8	0.16	210	0.74
Главное Русло	0.91	1.04	0.02	70	0.22
Сумма (*среднее) по дельте	87.0	100	1.45	2030	0.68*

Также по результатам обучаемой классификации получены характеристики горизонтальных деформаций для периода с 2000 по 2024 г. Общая площадь разрушений за период 24 года в изученных протоках и рукавах дельты составила 48,8 км<sup>2</sup>, то есть в год на рассматриваемом участке дельты Лены в среднем переформированием подвержено около 2,03 км<sup>2</sup> площади островов (рис. 5). С учетом длины разрушенных участков, которая составляет 1 364 км, средняя скорость разрушений берегов в дельте Лены за исследуемый период составила 1,49 м/год.

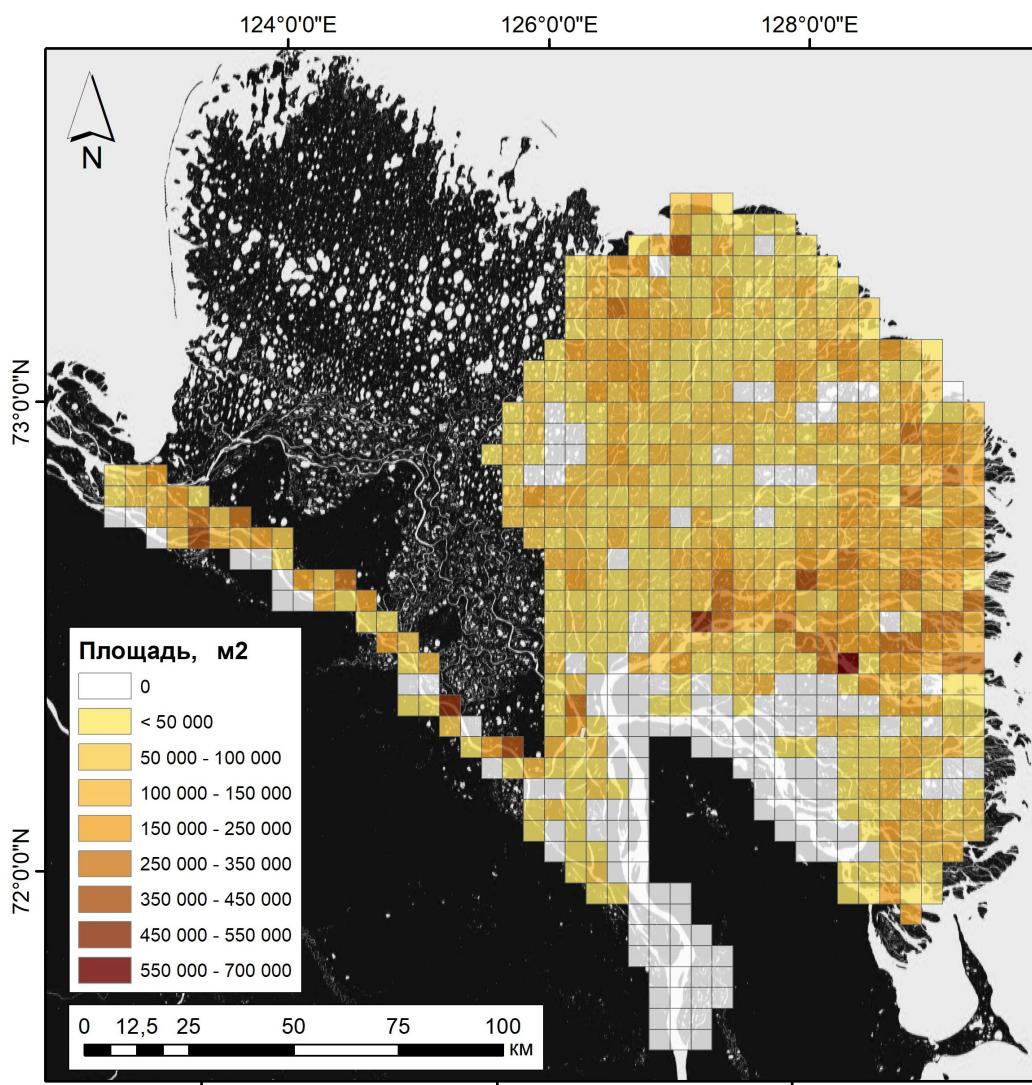


Рис. 5. Пространственное распределение суммы площадей разрушений в ячейках с 2000 по 2024 г.

Наибольшие значения береговых разрушений характерны также для сектора Трофимовской протоки, где переформированием было подвержено 22,5 км<sup>2</sup> островов, что составляет около 46% от общей площади разрушенных участков с 2000 по 2024 гг. При общей длине разрушений в 597 км, средняя скорость смещения береговой линии составляет 1,57 м/год.

Максимальные средние скорости горизонтальных деформаций характерны для протяженной Оленёкской протоки – 1,70 м/год. Однако за счет меньшей площади этого сектора дельты и меньшей длины разрушенных участков (длина составляет 137 км) в среднем за 24 года разрушилось 5,62 км<sup>2</sup> (11,5%), средняя скорость 0,23 км<sup>2</sup>/год.

Не менее активным является крупнейший по площади сектор Туматских проток, где за 24 года разрушению подверглось 16,8 км<sup>2</sup> островов. Суммарная длина разрушенных участков составила 498 км, что соответствует средней скорости 1,41 м/год. Сопоставим по скорости отступания берегов и центральный участок дельты, где скорость в среднем составляет 1,46 м/год – при площади разрушений 0,47 км<sup>2</sup> (1%) и длине измененной береговой линии 13 км.

Количественная характеристика разрушений берегов за период с 2000 по 2024 гг. представлена в таблице 2.

Табл. 2. Сравнительная характеристика эрозионных участков за период с 2000 по 2024 гг.

Сектор дельты	Площадь разрушений (F), км <sup>2</sup>	Площадь в % от F	Скорость, км <sup>2</sup> /год	Длина эрозионных берегов, км	Скорость, м/год
Трофимовский	22.5	46.2	0.94	597	1.57
Быковский	3.31	6.8	0.14	116	1.18
Туматский	16.8	34.5	0.70	499	1.41
Оленёкский	5.62	11.5	0.23	137	1.70
Главное Русло	0.47	1.0	0.02	13	1.46
Сумма (*среднее) по дельте	48.8	100	2.03	1 362	1.49*

Сравнение двух периодов 1964-2000 гг. и 2000-2024 гг. по данным ручной оцифровки на 50 равномерно распределённых ключевых участках демонстрирует, что темпы переформирований увеличились с 1,56 м/год до 2,57 м/год, то есть увеличение составило 66%. Также увеличились и максимальные скорости горизонтальных деформаций – с 3,02 м/год до 4,78 м/год, в среднем по дельте (табл. 3).

Табл. 3. Сравнение характеристик плановых переформирований за периоды 1964-2000 (1) и 2000-2024 (2)

Участки (количество)	Период	Площадь разрушений (F), км <sup>2</sup>	Длина эрозионных берегов, км <sup>2</sup>	Средняя скорость, м/год	Изменение средней скорости за период 1 и 2, %	Средняя максимальная скорость, м/год	Изменение средней максимальной скорости за период 1 и 2, %
Среднее по дельте	1	7,99	144	1.55	+66	3.02	+59
	2	9,81	168	2.57		4.78	
Трофимовская протока (19)	1	4,54	64	1.83	+66	4.21	+56
	2	5,32	74	3.03		6.58	
Туматская протока (13)	1	1,01	28	0.96	+94	1.83	+83
	2	1,52	31	1.87		3.34	
Оленёкская протока (9)	1	1,98	40	1.38	+55	3.11	+32
	2	2,34	48	2.14		4.11	
Быковская протока (6)	1	0,47	14	0.99	+73	1.68	+92
	2	0,62	15	1.71		3.22	

Значительное всего скорости увеличились на участке Быковской протоки (на островах, расположенных в нижней части рукавов): средние с 0,99 м/год до 1,71 м/год, а максимальные почти в 2 раза – с 1,68 м/год до 3,22 м/год.

Заметные изменения произошли и на участках берегов Туматской протоки, где средняя скорость возросла почти в 2 раза – с 0,96 м/год до 1,87 м/год. Аналогичная тенденция свойственна и максимальным скоростям: увеличение с 1,83 м/год до 3,34 м/год.

Интенсификация скоростей характерна для крупнейшего рукава дельты – Трофимовской протоки. В этой части темпы изменились с 1,83 м/год до 3,03 м/год. Увеличились также и максимальные скорости с 4,21 м/год до 6,58 м/год. Исключением является уступы обнажения Ледового комплекса острова Собо-Сисё, расположенного в одном из рукавов Трофимовского сектора – Сардахской протоке (рис. 6), где скорости плановых переформирований остаются высокими на протяжении двух исследуемых периодов: 1964-2000 гг. – 9,25 м/год, 2000-2024 гг. – 13,8 м/год.

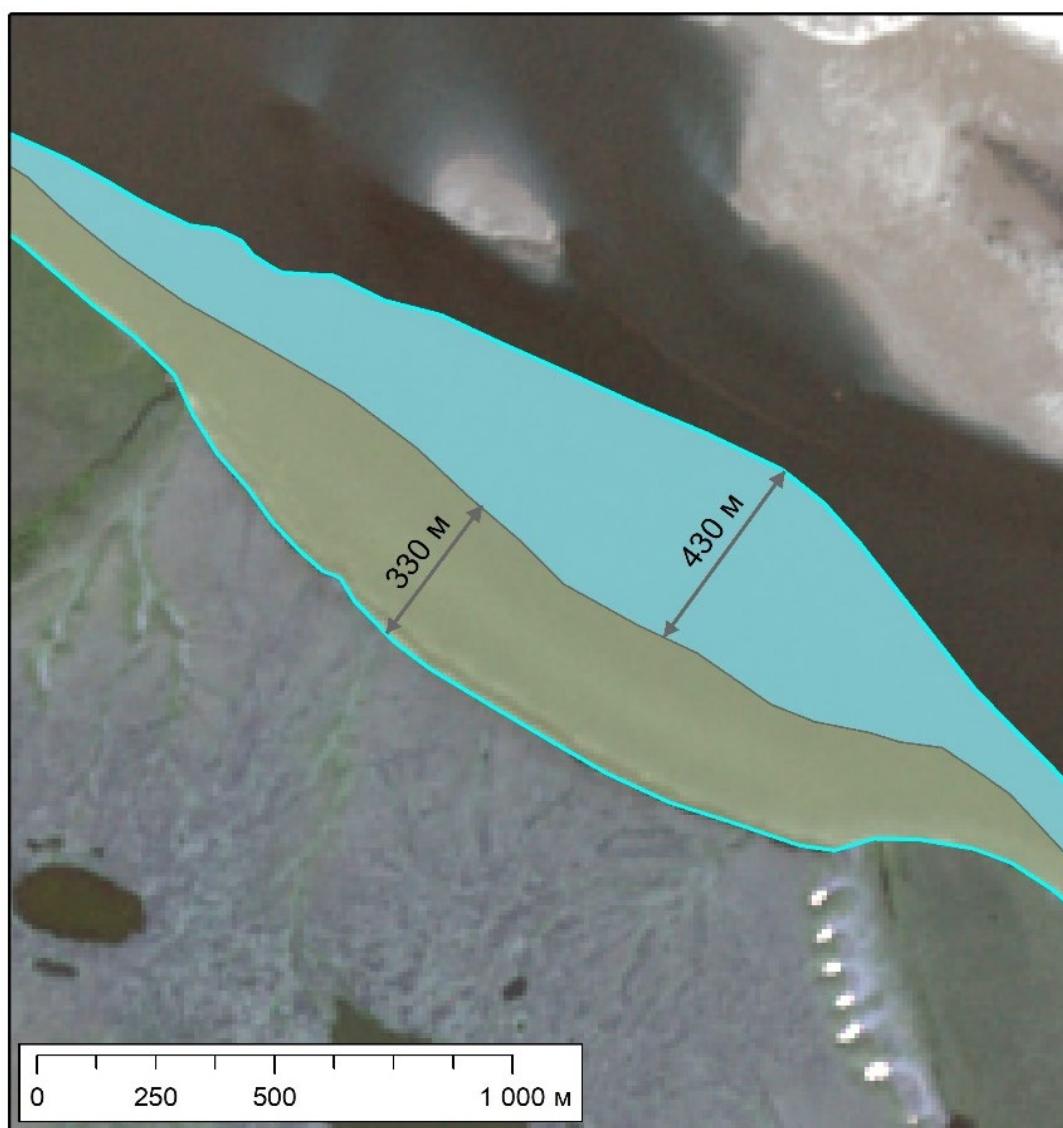


Рис. 6. Темпы разрушений берега о. Собо-Сисё за два периода: 1964-2000 (голубая область) и 2000-2024 (зеленая область).

Полученные результаты, указывающие на ключевую роль термоэрозии в отступании берегов, согласуются с классическими представлениями. Так, [Григорьев, 1993] выделяет термическое разрушение как ведущий фактор плановых переформирований в дельте р. Лены. Механизм отступания сопровождается блоковым (или речным по [Сухоровский, 1979]) разрушением, при котором таяние мерзлоты в совокупности с механическим воздействием потока приводит к крупнообломочному обрушению берегов. Данные настоящего исследования подтверждают, что именно этот комплекс процессов является основной причиной интенсивных плановых переформирований в дельте Лены.

**Заключение.** Анализ плановых переформирований по спутниковым снимкам показывает, что площади и скорости отступания берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, увеличиваются при движении от вершины дельты к МКД. Максимальные скорости и площади разрушения берегов характерны для сектора Трофимовской протоки. В результате сравнения двух периодов за 1964-2024 гг. и 2000-2024 гг. установлено, что средняя скорость разрушения дельтовых берегов составляет, соответственно, 0,68 м/год и 1,49 м/год. Обнаружено, что в секторах Туматской и Оленёкской проток суммарные площади разрушений могли увеличиться в 1,5-2,8 раза. Выявлено, что на локальных участках, приуроченных к зонам максимальных скоростей

отступания, средние скорости отступания берега увеличились с 1.55 м/год до 2.57 м/год. Установлено, что наибольшие изменения в средних скоростях и суммарной площади разрушений (по дельте) характерны для сектора Туматских проток (прирост более чем в два раза). Вероятно, что тенденция к увеличению скоростей отступания берегов связана с наблюдаемыми в этом регионе повышением температур воздуха и ММП. Однако это требует дальнейшего детального изучения. В связи с этим на о. Самойловский и о. Курунгнах в августе 2024 г. заложены стационары мониторинга положения береговой линии.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0001 Государственного задания ИВП РАН.

## ЛИТЕРАТУРА

*Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г.* Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб: ААНИИ, 2013. 268 с.

*Большиянов Д.Ю., Макеев В.М., Ёжикова И.С., Коблашов И.Д.* Динамика толщины деятельного слоя грунта и температуры многолетнемёрзлых пород на архипелаге северная земля и в дельте реки лены // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и северо-запада России. 2024. № 11. С. 476–482. doi:10.24412/2687-1092-2024-11-476-482

*Григорьев М.Н.* Криоморфогенез устьевой области р. Лены. Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН, 1993. 176 с.

*Гуков А.Ю.* Гидробиология устьевой области реки Лены. М.: Научный мир, 2001. 288 с.

*Коротаев В.Н.* Формирование гидрографической сети Ленской дельты // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 1984. № 6. С. 39–44.

*Михайлов В.Н.* Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 412 с.

*Суходровский В.Л.* Экзогенное рельефообразование в криолитозоне. М.: Наука, 1979. 280 с.

Третий Оценочный Доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. 2022.

Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития. М.: ГЕОС, 2007. 445 с.

AMAP Arctic Climate Change Update 2024: Key Trends and Impacts. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Tromsø, Norway, 2024. 122 p.

*Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.A., Schoeneich P., Romanovsky V.E., Lewkowicz A.G., Abramov A., Allard M., Boike J., Cable W.L., Christiansen H.H. et al.* Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. 2019. Vol. 10. № 1. P. 264. doi:10.1038/s41467-018-08240-4

*Boike J., Nitzbon J., Anders K., Grigoriev M., Bolshiyanov 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. Vol. 11. P. 261–299. doi:10.5194/essd-11-261-2019

*Rantanen M., Karpechko A.Yu., Lippinen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A.* The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // Communications Earth & Environment. 2022. Vol. 3. № 1. P. 168. doi:10.1038/s43247-022-00498-3

*Romanovsky V.E., Smith S.L., Isaksen K., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Kholodov A.L., Christiansen H.H., Drozdov D.S., Malkova G.V., Marchenko S.S.* Terrestrial Permafrost //

State of the Climate in 2018 // Bulletin of the American Meteorological Society. 2019. P. S153–S156. doi:10.1175/2019BAMSSStateoftheClimate.1

Smith S.L., Romanovsky V.E., Isaken K., Nyland K., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Christiansen H.H. Permafrost // State of the Climate in 2022. Bulletin of the American Meteorological Society. 2023. Vol. 104. P. S301-S305. doi:10.1175/BAMS-D-23-0079.1

Strauss J., Schirrmeyer L., Grosse G., Fortier D., Hugelius G., Knoblauch C., Romanovsky V., Schädel C., et al. Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability // Earth-Science Reviews. 2017. Vol. 172. P. 75–86. doi:10.1016/j.earscirev.2017.07.007

## PLANFORM DYNAMICS IN THE LENA RIVER DELTA

Prokopeva K.N.<sup>1</sup>, Koneva U.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

This study analyzes channel dynamics in the Lena River Delta under the influence of climate change and permafrost degradation. The processing of satellite imagery from 1964–2000 and 2000–2024 revealed a significant increase in the rate of riverbank retreat. The average rate of bank erosion more than doubled: from 1.55 m/year (1964–2000) to 2.57 m/year (2000–2024). The highest intensity of erosion was observed in the Trofimovskaya channel; however, the most significant increase in retreat rates was recorded in the Tumatskaya and Bykovskaya channels. The identified intensification of erosional processes is driven by the observed increase in air and permafrost temperatures in the Arctic region. Monitoring stations were established on Samoylovsky and Kurungnakh Islands in August 2024 to track the riverbank dynamics to facilitate further detailed study of the bank erosion processes. The results of this work are crucial for assessing the suspended sediment load into the Arctic Ocean.

Keywords: *permafrost, channel dynamics, thermal erosion, Ice Complex, Lena River delta, Arctic*

### REFERENCES:

- Bolshyanov D.Yu., Makarov A.S., Schneider W., Stoff G. Origin and Development of the Lena River Delta. St.Petersburg: AARI. 2013. 268 p.
- Bolshyanov D.Yu., Makeev V.M., Yozhikov I.S., Koblashov I.D. Dynamic of active layer thickness and permafrost temperature on the Severnaya Zemlya archipelago and in the Lena river delta // Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. 2024. Issue 11. P. 476-482. doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-476-482
- Grigoriev M.N. Cryomorphogenesis of the Lena River Mouth Area. Institut Merzlotovedeniya SO RAN. 1993. 76 p.
- Gukov A.Yu. Hydrobiology of the Lena River Estuary Area. Moscow: Nauchnyy Mir. 2001. 288 p.
- Korotaev V.N. Formation of the hydrographic network of the Lena Delta // Moscow University Bulletin. Series 5: Geography. 1984. № 6. P. 39–44.
- Mikhailov V.N. River Mouths of Russia and Neighboring Countries: Past, Present and Future. Moscow: GEOS. 1997. 412 p.
- Sukhodrovsky V.L. Exogenous Relief Formation in the Cryolithozone. M.: Nauka, 1979. 280p.
- Third Assessment Report on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation. Roshydromet. 2022.
- Estuarine-Delta Systems of Russia and China: Hydrological-Morphological Processes, Geomorphology and Development Forecast. Moscow: GEOS, 2007. 445 p.
- AMAP Arctic Climate Change Update 2024: Key Trends and Impacts. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Tromsø, Norway, 2024. 122 p.
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.A., Schoeneich P., Romanovsky V.E., Lewkowicz A.G., Abramov A., Allard M., Boike J., Cable W.L., Christiansen H.H. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. 2019. Vol. 10. № 1. P. 264. doi:10.1038/s41467-018-08240-4

*Boike J., Nitzbon J., Anders K., Grigoriev M., Bolshiyanov 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. Vol. 11. P. 261–299. doi:10.5194/essd-11-261-2019

*Rantanen M., Karpechko A.Yu., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A.* The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // *Communications Earth & Environment.* 2022. Vol. 3. № 1. P. 168. doi:10.1038/s43247-022-00498-3

*Romanovsky V.E., Smith S.L., Isaksen K., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Kholodov A.L., Christiansen H.H., Drozdov D.S., Malkova G.V., Marchenko S.S.* Terrestrial Permafrost // *State of the Climate in 2018* // *Bulletin of the American Meteorological Society.* 2019. P. S153–S156. doi:10.1175/2019BAMSStateoftheClimate.1

*Smith S.L., Romanovsky V.E., Isaksen K., Nyland K., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Christiansen H.H.* Permafrost // *State of the Climate in 2022. Bulletin of the American Meteorological Society.* 2023. Vol. 104. P. S301-S305. doi:10.1175/BAMS-D-23-0079.1

*Strauss J., Schirrmüller L., Grosse G., Fortier D., Hugelius G., Knoblauch C., Romanovsky V., Schädel C., et al.* Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability // *Earth-Science Reviews.* 2017. Vol. 172. P. 75–86. doi:10.1016/j.earscirev.2017.07.007