

РАЗНОНАПРАВЛЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ДИНАМИКЕ АРКТИЧЕСКИХ ОЗЁР НА СЕВЕРЕ СИБИРИ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА В 1985–2021 ГОДАХ

© 2024 г. Ю. М. Полищук¹, М. А. Куприянов¹, В. Ю. Полищук^{2,3,*}

¹Югорский НИИ информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

³Томский политехнический университет, Томск, Россия

*e-mail: yupolishchuk@gmail.com

Поступила в редакцию 29.03.2023 г.

После доработки 21.09.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2024 г.

Обсуждаются результаты анализа временных рядов данных о площадях озёр Сибирской Арктики по спутниковым снимкам и о среднегодовой температуре воздуха по результатам реанализа ERA5 за 36-летний период. Установлено значительное различие среднеегодовых температур воздуха (более 4°C) в регионах Ямала и Таймыра, на территориях которых выявлены разнонаправленные тенденции многолетних изменений площадей озёр.

Ключевые слова: дистанционные методы, спутниковые снимки, многолетняя мерзлота, термокарстовые арктические озёра Сибири, среднегодовая температура, реанализ метеоданных

DOI: 10.31857/S2076673424010101

ВВЕДЕНИЕ

Значительную часть арктических территорий Евразии и Северной Америки покрывают термокарстовые озёра, которые, по оценкам (Webb, Liljedahl, 2023), составляют наибольшую долю объёма поверхностных вод среди всех наземных биомов. Быстрое потепление в Арктике приводит к таянию вечной мерзлоты и изменению площади озёр, что может оказывать влияние на среду обитания диких животных и снабжение водой отдалённых арктических поселений. В условиях климатических изменений арктические озёра играют важную роль в круговороте углерода, являясь источниками эмиссии парниковых газов в атмосферу (Walter Anthony et al., 2018; Serikova et al., 2019; Turetsky et al., 2020).

Многочисленные исследования динамики площади озёр с использованием спутниковых снимков проведены в Западной Сибири, на Аляске и в других северных регионах (Викторов и др., 2017; Polishchuk et al., 2018; Zabelina et al., 2020; Veremeeva et al., 2021). На основе анализа большого числа работ о результатах исследований динамики площади озёр в различных арктических регионах Северной Евразии и Северной Америки установлено (Webb, Liljedahl, 2023), что под действием климатических изменений в зоне

прерывистого распространения мерзлоты большинство участков демонстрируют сокращение площади озера, в то время как в зоне сплошной мерзлоты наблюдаются разнонаправленные тенденции увеличения либо уменьшения площади озёр. Согласно (Webb, Liljedahl, 2023) многочисленные исследования динамики термокарстовых арктических озёр указывают на то, что основным фактором изменения площади озёр служит таяние вечной мерзлоты в результате повышения температуры воздуха, а не изменения в уровне осадков. Этот вывод подтверждается результатами регрессионного анализа данных о площадях озёр, полученных по спутниковым снимкам территории Таймырской тундры, и данных о среднегодовой температуре воздуха и годовой сумме осадков, которые показали, что изменения площади озёр определяются в основном изменениями температуры воздуха, а влиянием осадков можно пренебречь (Полищук и др., 2021). Поэтому в настоящей работе в качестве основного климатического параметра, влияющего на динамику площади озёр, принята среднегодовая температура воздуха на арктической территории Сибири.

Начиная со времени публикации (Smith et al., 2005 г.), проводятся исследования тенденций изменения площади озёр на арктических территориях.

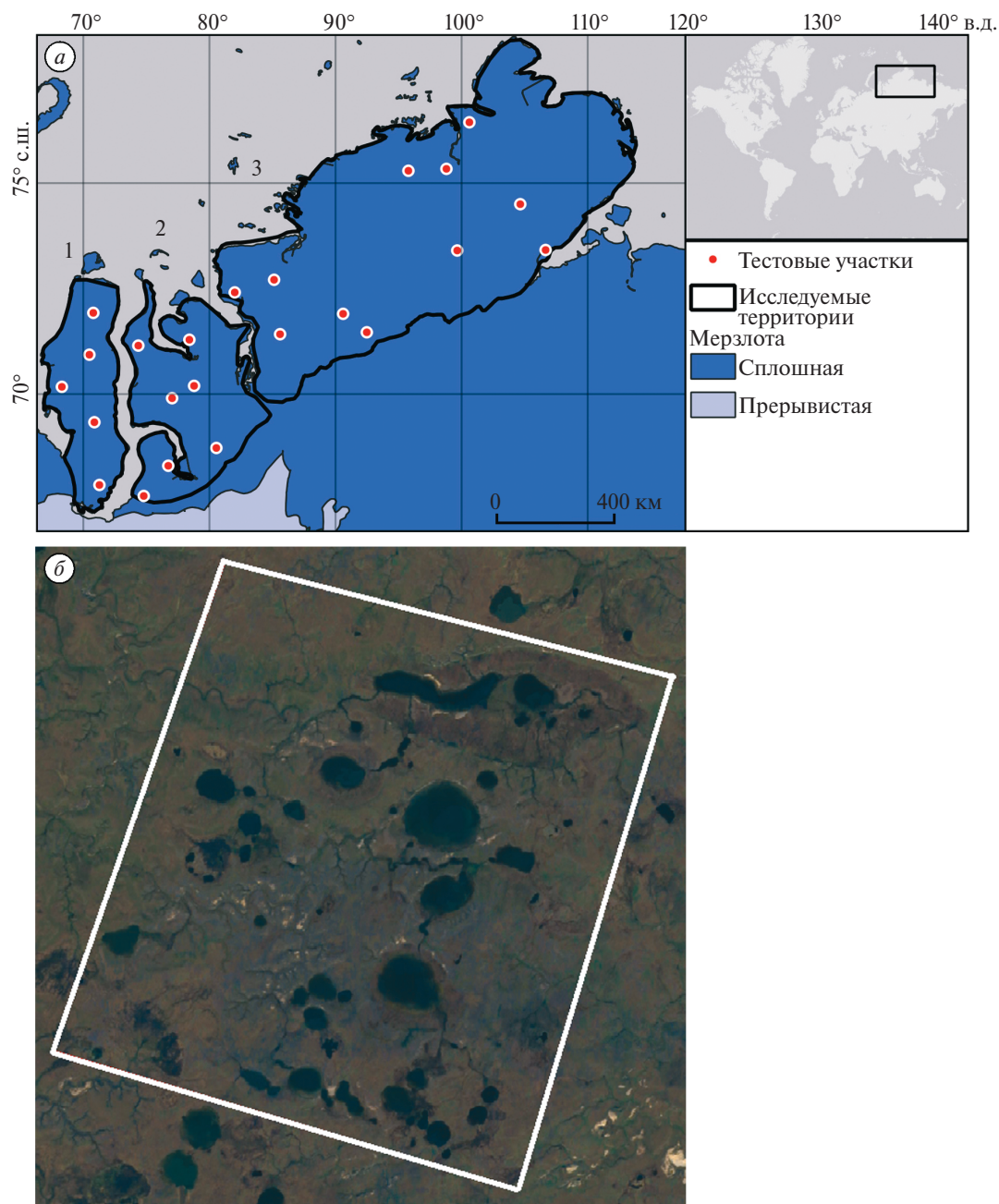


Рис. 1. Расположение тестовых участков и границ исследованных территорий Ямала (1), Гыдана (2) и Таймыра (3) на карте-схеме геокриологического зонирования (а) и фрагмент космического снимка территории Таймыра с обозначенной границей тестового участка (б).

Fig. 1. Location of test sites and boundaries of the studied territories Yamal (1), Gydan (2) and Taimyr (3) on the map-scheme of geocryological zoning (a) and a fragment of a satellite image of the territory of Taimyr with a marked border of the test area (b).

Однако вопросы, связанные с выявлением климатических факторов, ответственных за проявление определённой тенденции (сокращение или рост) в изменении площадей арктических озёр, до сих пор не изучены. Поэтому целью данной работы стало исследование особенностей динамики площадей термокарстовых озёр на арктических территориях

Сибири и установление климатического фактора, определяющего проявление той или иной тенденции (сокращение или рост) в изменении площадей озёр, на основе анализа временных рядов, данных об изменении среднегодовой температуры воздуха и площадей озёр, полученных по снимкам Landsat за 36-летний период начиная с 1985 г.

МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Для проведения исследований в арктической зоне Сибири выбраны три достаточно однородные по природным условиям соседние области на полуостровах Ямал, Гыдан и Таймыр, их площади составляют 114, 175 и 426 тыс. км² соответственно. Все три исследуемых региона расположены, согласно карте геоэкологического зонирования (Brown et al., 1997), в зоне сплошного распространения мерзлоты, и их можно рассматривать как сравнительно однородные в геоэкологическом отношении.

Для получения данных о динамике площадей озёр использовались 23 тестовых (ключевых) участка, положение которых приведено на рис. 1, а. Тестовые участки закладывались, как принято в дистанционных исследованиях термокарстовых озёр, в местах скопления озёр, т.е. в зонах активного термокарста (Викторов и др., 2017), и при условии отсутствия рек на их территории для исключения влияния речной сети на динамику озёр (например, исчезновение озёр в процессе их увеличения и смыкания с руслом рек). Размеры участков примерно одинаковы по площади (около 37 км²). Общая площадь исследованных тестовых участков (далее — ТУ) на территориях Ямала, Гыдана и Таймыра составила 860 км².

В работе использованы изображения со спутников Landsat 4, 5, 7 и 8 (пространственное разрешение 30 м). Всего использовано 372 безоблачных снимка за период с 1985 по 2021 г., они распределялись по исследуемым регионам следующим образом: 100, 182 и 90 снимков на Ямале, Гыдане и Таймыре соответственно. Для иллюстрации фрагмент снимка территории Таймыра с обозначенной границей тестового участка приведён на рис. 1, б. Чтобы уменьшить влияние колебаний уровня воды по сезонам, космические снимки выбирались, как принято в дистанционных исследованиях термокарстовых озёр, в достаточно короткий летний период (июль — август).

Площади озёр измеряли по космическим снимкам с помощью средств геоинформационной системы QGIS3.2. Минимальная площадь озёр ограничена величиной 4500 м², соответствующей площади на снимке 5 пикселей, обеспечивающей достаточно достоверное определение озёр малых размеров на фоне “шумов” изображения. Более подробно вопросы обработки и анализа снимков для получения данных о динамике площадей озёр в зонах мерзлоты рассмотрены в (Полищук и др., 2021).

Для анализа тенденций в изменении площадей озёр в условиях меняющейся температуры в работе наряду с данными об изменении среднегодовой температуры использованы временные ряды данных о средних значениях площадей озёр (на каждом ТУ), полученных путём осреднения

значений площади озёр на всех ТУ за каждый год. Использованные в анализе временные ряды среднегодовой температуры воздуха получены за исследуемый период по результатам реанализа метеоданных, позволяющего определить значения температуры в конкретных точках района исследований, а именно: в центрах тестовых участков. В нашем исследовании использованы данные системы реанализа ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview>).

Согласно данным регрессионного анализа (Полищук и др., 2021) “...влияние изменений среднегодовой температуры на величину средней площади термокарстовых озёр оказывается определяющим и значительно (на два порядка) превышает влияние уровня осадков на изменение площади озёр, т.е. влиянием осадков на изменение площадей термокарстовых озёр по данным за 35-летний период исследований на данной территории можно пренебречь по сравнению с воздействием среднегодовой температуры”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно изложенному выше временные ряды средних значений площади озёр и среднегодовой температуры для исследуемых территорий Ямала, Гыдана и Таймыра сформированы за период 1985–2021 гг. Для характеристики качества статистического материала временных рядов в таблице представлены данные о среднем значении площади озёр (по всем тестовым участкам каждого региона) и величине разброса годовых выборок значений площадей озёр, использованных для формирования временных рядов данных для территорий исследованных регионов. В связи с тем что из-за пасмурной погоды на некоторых ТУ в отдельные годы вообще не удалось найти безоблачных летних снимков, во временных рядах данных о средних (по территории) площадях озёр возникли пропуски данных, что видно в таблице. По причине пасмурной погоды в отдельные годы (например, 1992 г.) была определена площадь озёр только на одном ТУ, что и определило нулевой разброс в такие годы в таблице.

На рис. 2 представлены графики временных рядов значений средних площадей озёр и среднегодовой температуры воздуха на разных территориях исследований. Для изучения особенностей динамики площадей озёр в условиях воздействия изменений температуры на разных территориях исследования временные ряды (см. рис. 2) аппроксимировались линейным уравнением

$$y = ax + b, \quad (1)$$

где a — коэффициент линейного тренда (га/год); x — время (в годах); b — свободный член уравнения аппроксимации.

Таблица. Средняя площадь озёр и диапазоны разброса данных о площади озёр на всех тестовых участках на территориях регионов за период 1985–2021 гг.

Год	Ямал		Гыдан		Таймыр	
	диапазоны разброса, га	средняя площадь, га	диапазоны разброса, га	средняя площадь, га	диапазоны разброса, га	средняя площадь, га
1985	—	—	7.61–0.74	8.99	7.59–9.82	8.54
1986	16.6–20.58	18.59	—	—	3.16–10.1	6.94
1987	6.05–16.37	10.61	7.21–13.37	9.12	4.06–10.41	7.89
1988	5.94–20.32	15.07	7.61–14.87	9.64	7.07–24.78	13
1989	6.06–17.12	12.23	8.03–15.36	11.69	—	—
1990	14.64–23.53	18.44	7.15–10.79	8.62	2.94–10.06	6.5
1991	0	16.82	7.24–15.15	9.56	7.46–10.34	8.9
1992	0	16.33	0	7.73	—	—
1993	5.32–21.88	12.06	0	8.77	—	—
1994	5.15–16.21	9.99	8.6–15.34	10.96	8.05–10.47	9.26
1995	8.73–15.91	12.32	6.9–10.8	8.52	4.16–10.51	7.34
1996	0	17.44	7.86–14.31	10.25	—	—
1997	0	16.59	6.57–13.93	9.46	2.8–10.24	6.74
1998	8.72–19.03	13.88	6.76–15.87	10	7.02–10.25	8.69
1999	—	—	—	—	8.16–10.14	9.46
2000	5.14–16.82	12.73	6.7–16.33	10.2	7.04–24.22	11.87
2001	5.15–20.9	13.78	6.66–16.14	10.1	3.05–25.09	10.63
2002	—	—	0	7.96	7.14–39.06	18.12
2003	—	—	—	—	—	—
2004	—	—	—	—	—	—
2005	—	—	—	—	—	—
2006	0	17.25	6.51–10.71	9.07	0	7.59
2007	—	—	7.65–16.15	10.98	—	—
2008	—	—	—	—	—	—
2009	8.37–17.07	12.72	6.34–16.38	10.05	3.08–10.26	7.13
2010	—	—	0	7.31	0	10.29
2011	0	8.11	0	9.06	—	—
2012	—	—	—	—	—	—
2013	5.08–20.5	13.42	6.48–14.97	9.16	3.03–38.54	12.1
2014	7.91–17.53	13.13	7.52–10.81	9.16	—	—
2015	—	—	6.45–10.7	8.51	3.05–39	12.19
2016	5.3–18.51	13.13	6.46–16.68	9.56	4.13–10.52	7.56
2017	5.4–17.37	11.68	6.48–15.83	9.21	6.62–10.75	8.07
2018	7.77–15.55	13.55	6.04–16.44	9.56	7.05–39.31	18.15
2019	5.15–17.73	11.45	6.29–10.55	7.93	5.55–38.88	13.16
2020	5.15–17.85	12.53	6.08–12.35	8.73	2.84–10.7	7.31
2021	4.91–15.77	10.34	6.15–12.2	8.76	—	—

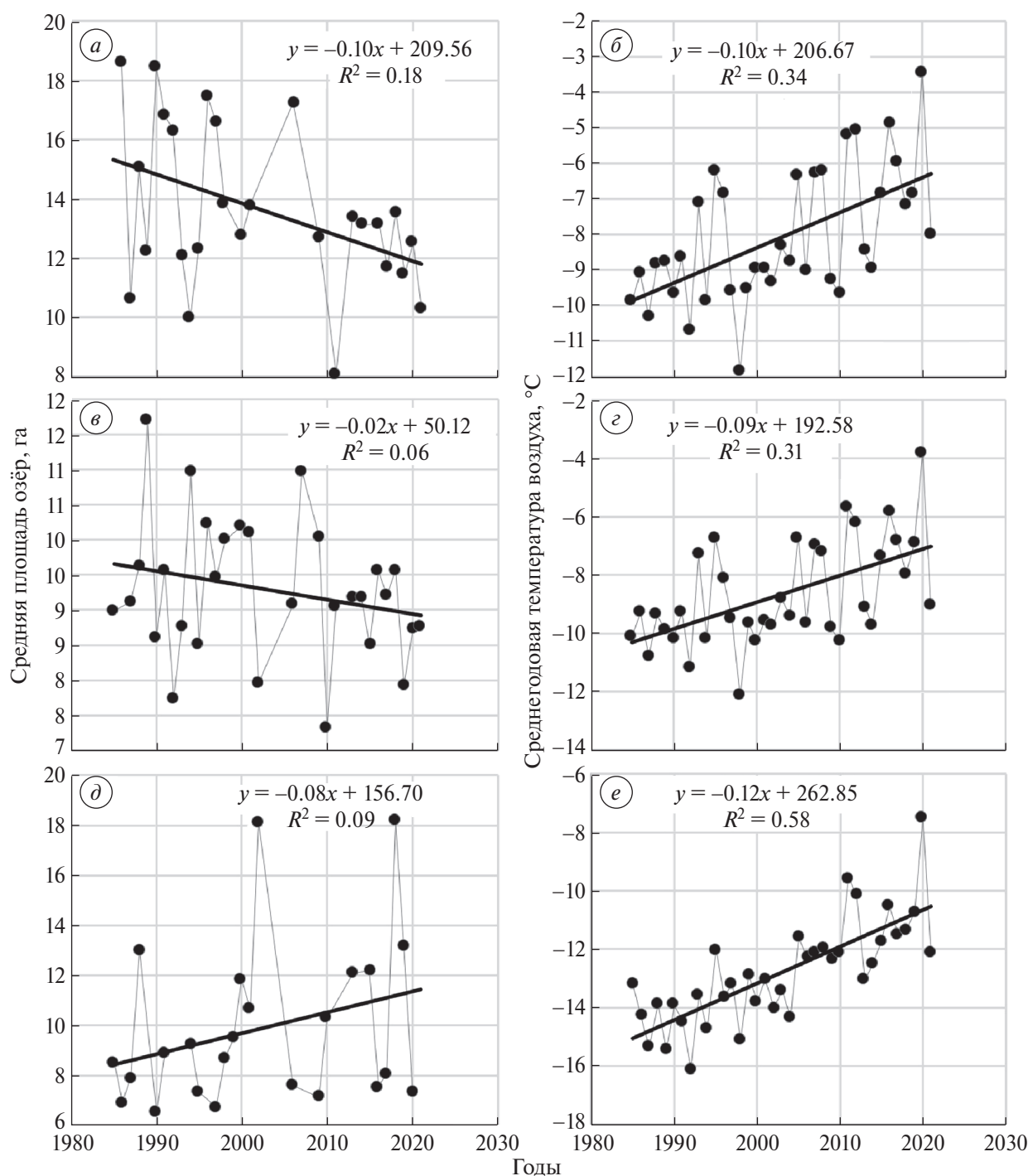


Рис. 2. Временные ряды данных о средней (по всем тестовым участкам региона) площади озёр (а, в, д) и среднегодовой температуре (б, г, е) на территориях регионов Ямала (а, б), Гыдана (в, г), Таймыра (д, е).

Fig. 2. Time series of data on the average (for all test areas of the region) area of lakes (a, в, д) and average annual temperature (б, г, е) in the regions of Yamal (a, б), Gydan (в, г), Taymyr (д, е).

Рассчитанные согласно (1) уравнения линейной аппроксимации временных рядов площади озёр и среднегодовой температуры воздуха на территории Ямала представлены в поле графиков (см. рис. 2). Точки на графиках (см. рис. 2, а)

представляют средние значения площадей озёр, а на рис. 2, — среднегодовой температуры. Отрезки сплошных линий на этих графиках отображают линейные тренды изменения рассматриваемых показателей, полученные по результатам

аппроксимации временных рядов линейным уравнением вида (1).

Как видно из рис. 2, а, изменение средней площади озёр на территории Ямала проявляет заметный отрицательный линейный тренд с коэффициентом -0.1 га/год, показывающий тенденцию сокращения во времени площади озёр на этой территории за 1985–2021 гг. А по данным рис. 2, б изменение среднегодовой температуры на территории Ямала, демонстрирующее положительный линейный тренд с коэффициентом тренда $0.10^\circ\text{C}/\text{год}$, показывает рост температуры в среднем за время исследования на этой территории.

Аналогичный анализ временных рядов площадей озёр и температуры воздуха на территориях Гыдана и Таймыра показал, что коэффициенты трендов временных рядов температуры в этих регионах равны 0.09 и $0.13^\circ\text{C}/\text{год}$ соответственно, что демонстрирует ту же тенденцию повышения среднегодовой температуры, что и на территории Ямала. А изменения в среднем площадей озёр показали разнонаправленные тенденции, проявляющиеся в сокращении площадей озёр на Гыдане (коэффициент тренда -0.02 га/год) и в их росте (с коэффициентом тренда 0.08 га/год) на территории Таймыра.

Следовательно, сопоставление трендов изменения площадей озёр и среднегодовой температуры воздуха на исследованных нами территориях показало (см. рис. 2), что в условиях приблизительно одинаковых за период исследования темпов роста температуры воздуха (значений коэффициентов тренда) на разных исследованных территориях Сибирской Арктики проявляются разнонаправленные тенденции в изменении размеров термокарстовых озёр — на территориях Ямала и Гыдана происходит сокращение площадей озёр, а на Таймыре — их рост. Этот вывод, основанный на наших количественных оценках по результатам анализа временных рядов, соответствует данным (Webb, Liljedahl, 2023), полученным на экспертном (качественном) уровне в результате анализа большого числа публикаций, представляющих результаты исследований динамики площадей озёр в разных арктических регионах Северной Америки и Евразии.

Однако ни в цитированной выше работе (Webb, Liljedahl, 2023), ни в других публикациях по обсуждаемой теме не рассматриваются вопросы, связанные с установлением факторов, ответственных за проявление той или тенденции (сокращение или рост) в изменении площадей арктических озёр. Полученные в нашей работе данные о временных рядах площадей озёр и температуры воздуха на разных арктических территориях, а также результаты проведённого анализа этих временных рядов дают основание поставить задачу установления фактора, определяющего проявление той или иной тенденции (сокращения/роста) изменения площади озёр.

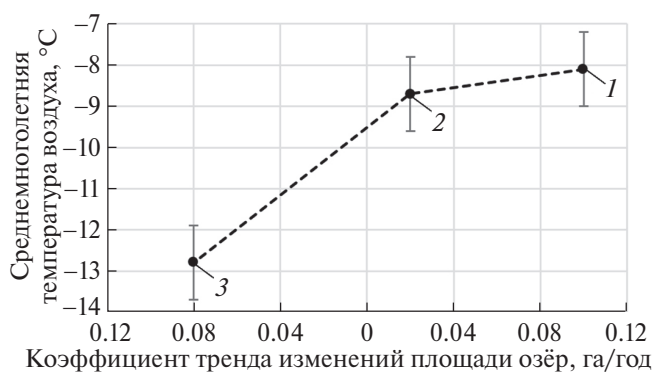


Рис. 3. Сопоставление величин коэффициентов линейного тренда изменений площади озёр и средней (за период 1985–2021 гг.) температуры воздуха на территориях Ямала (1), Гыдана (2) и Таймыра (3).

Fig. 3. Comparison of the values of the coefficients of the linear trend of changes in the area of lakes and the average (for the period 1985–2021) air temperature in the territories of Yamal (1), Gydan (2) and Taimyr (3).

В связи с этим проведено сопоставление величин среднегодовой (за период исследований) температуры и коэффициентов линейного тренда изменений площадей озёр в разных регионах, определённых как значения линейного коэффициента a в уравнении аппроксимации (1).

Результаты этого сопоставления представлены в виде графика (рис. 3), на котором приведены значения коэффициентов линейного тренда изменения площадей озёр, равные -0.10 , -0.02 и 0.08 га/год для трёх исследованных регионов соответственно. Отрезки прямых линий на графиках показывают доверительные интервалы для среднегодовой значения температуры воздуха, вычисленные для доверительной вероятности 95%. Как видно из графика (см. рис. 3), на территориях Ямала и Гыдана, где наблюдается сокращение площадей озёр, среднегодовая температура воздуха равна -8.1 ± 0.9 и $-8.7 \pm 0.9^\circ\text{C}$ соответственно, т.е. в среднем не превышает по абсолютной величине значение -9°C . А на более “холодной” территории Таймыра, где среднегодовая температура составляет $-12.8 \pm 0.94^\circ\text{C}$, наблюдается рост площадей озёр. Следовательно, можно констатировать, что при изменении температуры приблизительно в пределах от -9 до -13°C на разных арктических территориях наблюдается кардинальная смена тенденций в изменении площадей озёр, т.е. переход за период исследования от тренда сокращения площадей на более “тёплых” территориях Ямала и Гыдана к их росту на более “холодной” территории Таймыра.

В качестве объяснения полученных результатов отметим, что на основе анализа данных многочисленных исследований термокарстовых процессов в зонах многолетней мерзлоты, выполненного

в (Webb, Liljedahl, 2023), можно выделить два одновременно протекающих процесса, определяющих характер динамики площадей термокарстовых озёр: возникновение (формирование) новых термокарстовых озёр, приводящих к росту их суммарных, а следовательно, и средних по территории площадей; спуск воды из озёр с последующим образованием осушённых, дренированных котловин (хасыреев, аласов), вызывающих сокращение площадей озёр.

Ускорение термокарстовых и эрозионных процессов в зоне мерзлоты под воздействием повышения температуры воздуха в последние десятилетия сопровождается, с одной стороны, ростом числа молодых вновь формирующихся озёр малых размеров, а с другой — ускорением спуска воды из одних озёр (как правило, малых размеров) в другие, более крупные озёра. Механизмы спуска озёр, приводящего к сокращению общей площади озёр, обсуждаются в разных публикациях, в частности в (Kirpotin et al., 2008; Webb, Liljedahl, 2023). В качестве наиболее вероятного механизма в (Kirpotin et al., 2008) рассматривается почвенный дренаж при оттаивании мёрзлых грунтов в результате повышения температуры почвы. В цитируемой работе представлена феноменологическая модель, объясняющая механизм спуска воды из малых озёр (как правило, более молодых по возрасту) в более крупные озёра, существующие уже достаточно продолжительное время (до сотен и тысяч лет), что позволяет им накопить массу воды, достаточную для проседания дна озера из-за таяния подстилающих пород. Из-за пониженного уровня водного зеркала таких озёр по сравнению с окружающими озёрами малых размеров крупные озёра работают как воронки для сбора воды из малых озёр, поступающей в результате почвенного (подпочвенного) дренажа в результате оттаивания мёрзлых грунтов при повышении температуры воздуха. Такая модель позволяет объяснить сокращение общей площади термокарстовых озёр, а следовательно, и их средней площади на определённой территории в зоне мерзлоты за счёт спуска воды из малых озёр.

На любой территории в зоне мерзлоты одновременно действуют оба рассмотренных выше процесса (возникновение озёр и их спуск). Можно предполагать на основании графика (см рис. 3), что в зависимости от величины среднемноголетней (за период исследования) температуры воздуха на разных арктических территориях будет преобладать один из этих процессов. Согласно данным (см. рис. 3) на территориях Ямала и Гыдана, где среднемноголетняя температура воздуха не превышает по абсолютной величине значения -9°C , наблюдается сокращение площадей, т.е. преобладает процесс спуска малых озёр в более крупные. А на более “холодной” территории Таймыра, где среднемноголетняя температура составляет

приблизительно -13°C , преобладает процесс формирования новых озёр, что и приводит к наблюдаемому на этой территории росту площадей озёр.

Сформулированные выше закономерности динамики термокарстовых озёр, установленные на ограниченной по площади арктической территории регионов Ямала, Гыдана и Таймыра, могут стимулировать проведение аналогичных исследований в других регионах Российской Арктики. Заметим, что установленные закономерности получены на основе анализа временных рядов площадей озёр, которые демонстрируют значительный разброс данных и могут быть связаны, с одной стороны, с ограниченным числом использованных тестовых участков, вызываемым дефицитом летних безоблачных спутниковых снимков, а с другой стороны, с влиянием различных разнородных факторов, к числу которых можно отнести льдистость и температуру грунтов, глубину сезонного протаивания, характер рельефа и речной (гидрографической) сети, особенности геологических отложений, растительного и почвенного покрова, климатических характеристик и др. Эти факторы проявляют значительную пространственную неоднородность. Большинство из перечисленных факторов не контролируются космическими изображениями земной поверхности, что требует для изучения их влияния на изменения площади озёр привлечения других методов исследования, применяемых в различных науках о Земле. Однако такие исследования выходят за рамки настоящей работы, хотя влияние некоторых факторов минимизировалось, например, с выбором тестовых участков: при отсутствии рек на их территории практически устранялось влияние фактора влияния речной сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа временных рядов среднегодовой температуры воздуха на арктических территориях Ямала, Гыдана и Таймыра за 36-летний период исследования установлена тенденция повышения температуры с приблизительно одинаковым темпом роста как проявление современного глобального потепления. Проведённый анализ временных рядов площади озёр на указанных территориях, основанный на данных дистанционных измерений по спутниковым снимкам за тот же период 1985–2021 гг., показал на Ямале и Гыдане тенденцию сокращения площадей озёр, а на территории Таймыра — противоположную тенденцию роста площадей.

На основе проведённого анализа можно сделать вывод о том, что в условиях воздействия наблюдаемого в последние десятилетия повышения среднегодовой температуры воздуха на термокарстовые процессы в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов на арктических территориях

проявляются разнонаправленные тенденции в динамике площадей термокарстовых озёр, такие как увеличение площадей озёр в Таймырской Арктике и их уменьшение на западно-сибирских арктических территориях. Эта закономерность может представлять интерес для специалистов, связанных с прогнозированием объёмов эмиссии метана из термокарстовых озёр на обширных арктических территориях.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда по проекту № 22-11-023.

Acknowledgments. This work was supported by grant from the Russian Science Foundation, project no. 22-11-023.

ЛИТЕРАТУРА

- Викторов А. С., Капралова В. Н., Орлов Т. В., Трапезникова О. Н., Архипова М. В., Березин П. В., Зверев А. В., Панченко Е. Н., Садков С. А. Закономерности распределения размеров термокарстовых озёр // Доклады Академии наук. 2017. Т. 474. № 5. С. 625–627. <https://doi.org/10.7868/S0869565217170212>
- Полищук В. Ю., Куприянов М. А., Полищук Ю. М. Анализ взаимосвязи изменений климата и динамики термокарстовых озёр в арктической зоне Таймыра // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 193–200. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-193-200>
- Brown J., Ferrians O., Heginbottom J. A., Melnikov E. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 1 Boulder, Colorado USA // National Snow and Ice Data Center. 2014. DATA SET ID: GGD318. <https://doi.org/10.7265/8d57-9f79>
- Kirpotin S., Polishchuk Y., Zakharova E., Shirokova L., Pokrovsky O., Kolmakova M., Dupre B. One of the possible mechanisms of thermokarst lakes drainage in West-Siberian North // Intern. Journ. Environmental Studies. 2008. V. 65. No. 5. P. 631–635.
- Permafrost in the Northern hemisphere // European Environment Agency (EEA) // Retrieved from: https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/N9M4KCR6UP (Last access: 23 July 2023).
- Polishchuk Y. M., Bogdanov A. N., Muratov I. N., Polishchuk V. Y., Lim A., Manasypov R. M., Shirokova L. S., Pokrovsky O. S. Minor contribution of small thaw ponds to the pools of carbon and methane in the inland waters of the permafrost — affected part of the Western Siberian lowland // Environmental Research Letters. 2018. V. 13. P. 1–16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab046>
- Serikova S., Pokrovsky O. S., Laudon H., Krickov I. V., Lim A. G., Manasypov R. M., Karlsson J. High carbon emissions from thermokarst lakes of Western Siberia // Nature Communications. 2019. V. 10. P. 1552. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09592-1>
- Turetsky M. R., Abbott B. W., Jones M. C., Walter Anthony K., Olefeldt D., Schuur E. A., Grosse G., Kuhry P., Hugelius P., Koven C., Lawrence D., Gibson C., Sannel A., McGuire A. D. Carbon release through abrupt permafrost thaw. Nature Geoscience. 2020. V. 13. P. 138–143. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0526-0>
- Smith L. C., Sheng Y., MacDonald G. M., Hinzman L. D. Disappearing Arctic Lakes // Science. 2005. V. 308. No. 3. P. 111–154.
- Veremeeva A., Nitze I., Gunter F., Rivkina E. Geomorphological and climatic drivers of thermokarst lake area increase trend (1999–2018) in the Kolyma Lowland Yedoma region, north-eastern Siberia // Remote Sensing. 2021. V. 13. 178 p.
- Walter Anthony K., Schneider T., Nitze I., Froliking S., Edmond A., Daanen R., Anthony P., Lindgren P., Jones B., Grosse G. 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes // Nature Communications. 2018. V. 9. P. 3262. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05738-9>
- Webb E. E., Liljedahl A. K. Diminishing lake area across the northern permafrost zone // Nature Geoscience. 2023. V. 16. P. 202–209. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01128-z>
- Zabelina S., Shirokova L., Klimov S., Chupakov A., Lim A., Polishchuk Y., Polishchuk V., Bogdanov A., Muratov I., Guerin F., Karlsson J., Pokrovsky O. Carbon Emission Related to Thermokarst Processes in Wetlands of NE European Tundra // Limnology and Oceanography. 2020. 9999. P. 1–15. <https://doi.org/10.1002/Ino.11560>

Citation: Polishchuk Y. M., Kupriyanov M. A., Polishchuk V. Y. Different trends in the dynamics of Arctic lakes in North Siberia under climate change in 1985–2021. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (1): 133–142 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424010101

Different trends in the dynamics of Arctic lakes in North Siberia under climate change in 1985–2021

Y. M. Polishchuk^a, M. A. Kupriyanov^a, V. Y. Polishchuk^{b,c,#}

^aUgra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia

^bInstitute of Monitoring of Climate and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russia

^cTomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

[#]e-mail: yupolishchuk@gmail.com

Received March 29, 2023;
revised September 21, 2023;
accepted March 31, 2024

The methods and results of a comparative analysis of the effects of climate changes on the dynamics of the areas of thermokarst lakes over the past 36 years in the Arctic regions on the Yamal, Gydan, and Taimyr peninsulas are considered, the areas of which are 114, 175 and 426 thousand km², respectively. All three regions are located within the permafrost zone of the Siberian Arctic. Using images of the Landsat 4, 5, 7, and 8 satellites, time series of data on average values of lake areas for the indicated regions were obtained on the basis on averaging areas of lakes over 23 test (key) areas. The total area of the test sites is about 800 km². Using the ERA5 reanalysis system, time series of data on the mean annual air temperature in these territories have been generated, which show a rise of the temperature over the studied period 1985–2021. A comparison of trends in changes in regional mean areas of lakes and mean annual air temperature shows that with approximately the same rate of the temperature rise on these peninsulas, different trends in the dynamics of the lake areas are observed, which are manifested, on the one hand, in a noticeable reduction in the areas of lakes in the territories of Yamal and Gydan and, on the other hand, in their growth in Taimyr. Air temperature averaged over the period 1985–2021 and coefficients of the linear trend of changes in the lake areas in each of the above regions were compared. The results show that on the territories of Yamal and Gydan, where the lake areas decrease, the mean air temperature for the same period is equal to -8.1 ± 0.9 and -8.9 ± 0.9 °C, respectively. On the Taimyr territory, where the lake areas increase, the mean air temperature is significantly lower: -12.8 ± 0.94 °C. Thus, this makes possible to make a conclusion that these considered regions differ significantly from each other by values of mean air temperature, and respectively, they are characterized by different trends in changes in areas of the thermokarst lakes.

Keywords: remote sensing, permafrost, thermokarst Arctic lakes in Siberia, annual average temperature, reanalysis of meteorological data

REFERENCES

- Viktorov A. S., Kapralova V. N., Orlov T. V., Trapeznikova O. N., Arkhipova M. V., Berezin P. V., Zverev A. V., Panchenko E. N., Sadkov S. A. Regularities in the size distribution of thermokarst lakes. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. Reports of the Academy of Sciences. 2017, 474 (5): 625–627. <https://doi.org/10.7868/S0869565217170212> [In Russian].
- Polishchuk V. Yu., Kupriyanov M. A., Polishchuk Y. M. Analysis of relationship between climate change and dynamics of thermokarst lakes in Arctic zone of Taimyr. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Current problems of remote sensing of Earth from space. 2021, 18 (5): 193–200. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-193-200> [In Russian].
- Brown J., Ferrians O., Heginbottom J. A., Melnikov E. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice

- Conditions, Version 1 Boulder, Colorado USA. National Snow and Ice Data Center. 2014. DATA SET ID: GGD318. <https://doi.org/10.7265/8d57-9f79>
- Kirpotin S., Polishchuk Y., Zakharova E., Shirokova L., Pokrovsky O., Kolmakova M., Dupre B. One of the possible mechanisms of thermokarst lakes drainage in West-Siberian North. *Intern. Journ. Environmental Studies*. 2008, 65 (5): 631–635.
- Permafrost in the Northern hemisphere*. European Environment Agency (EEA). Retrieved from: https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/N9M4KCR6UP (Last access: 23 July 2023).
- Polishchuk Y. M., Bogdanov A. N., Muratov I. N., Polishchuk V. Y., Lim A., Manasypov R. M., Shirokova L. S., Pokrovsky O. S. Minor contribution of small thaw ponds to the pools of carbon and methane in the inland waters of the permafrost — affected part of the Western Siberian lowland. *Environmental Research Letters*. 2018, 13: 1–16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab046>
- Serikova S., Pokrovsky O. S., Laudon H., Krickov I. V., Lim A. G., Manasypov R. M., Karlsson J. High carbon emissions from thermokarst lakes of Western Siberia. *Nature Communications*. 2019, 10: 1552. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09592-1>
- Turetsky M. R., Abbott B. W., Jones M. C., Walter Anthony K., Olefeldt D., Schuur E. A., Grosse G., Kuhry P., Hugelius P., Koven C., Lawrence D., Gibson C., Sannel A., McGuire A. D. Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nature Geoscience*. 2020, 13: 138–143. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0526-0>
- Smith L. C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L. D. Disappearing Arctic Lakes. *Science*. 2005, 308 (3): 111–154.
- Veremeeva A., Nitze I., Gunter F., Rivkina E. Geomorphological and climatic drivers of thermokarst lake area increase trend (1999–2018) in the Kolyma Lowland Yedoma region, north-eastern Siberia. *Remote Sensing*. 2021, 13: 178.
- Walter Anthony K., Schneider T., Nitze I., Froliking S., Edmond A., Daanen R., Anthony P., Lindgren P., Jones B., Grosse G. 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. *Nature Communications*. 2018, 9: 3262. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05738-9>
- Webb E. E., Liljedahl A. K. Diminishing lake area across the northern permafrost zone. *Nature Geoscience*. 2023, 16: 202–209. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01128-z>
- Zabelina S., Shirokova L., Klimov S., Chupakov A., Lim A., Polishchuk Y., Polishchuk V., Bogdanov A., Muratov I., Guerin F., Karlsson J., Pokrovsky O. Carbon Emission Related to Thermokarst Processes in Wetlands of NE European Tundra. *Limnology and Oceanography*. 2020, 9999: 1–15. <https://doi.org/10.1002/Ino.11560>