

Термокарстовые озёра Чукотской тундры по снимкам Sentinel-2

Ю. М. Полищук, И. Н. Муратов

*Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий
Ханты-Мансийск, 628011, Россия
E-mail: yupolishchuk@gmail.com*

Статья посвящена дистанционным исследованиям характеристик арктических термокарстовых озёр Чукотской тундры. Используются космические снимки с аппаратов Sentinel-2, полученные в летние месяцы 2017–2021 гг. Дешифрирование озёр проведено на мозаике спутниковых изображений Sentinel-2 и направлено на определение численности озёр и их площадей на исследуемой территории. Определены плотность озёр и степень заозёрности на территории Чукотской тундры, величины которых составили $0,29 \text{ км}^{-2}$ и $0,014$ соответственно. Получены гистограммы распределения озёр в диапазоне их размеров от $2 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^7 \text{ м}^2$ на исследованной арктической территории Чукотки. Гистограмма распределения числа озёр по размерам демонстрирует тенденцию роста количества озёр по мере уменьшения их размеров, проявляющуюся в аналогичных исследованиях и в других регионах. Гистограмма распределения суммарных площадей озёр по интервалам их размеров показывает, что основной вклад в общую площадь арктических озёр Чукотки дают большие водоёмы — до 90 %, а вклад малых водоёмов достаточно мал и не превышает 10 %. Полученные результаты могут быть использованы в задачах оценки объёмов эмиссии парниковых газов в атмосферу на территории Чукотки.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, геоинформационные системы, космические снимки, арктическая тундра, термокарстовые озёра, гистограммы распределения озёр по размерам, Чукотская тундра

Одобрена к печати: 05.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-205-213

Введение

Значительную часть площади арктических территорий Евразии и Северной Америки покрывают термокарстовые озёра, которые, по оценкам авторов работ (Webb, Liljedahl, 2023; Webb et al., 2022), составляют наибольшую долю поверхностных вод среди всех наземных биомов. Эти озёра обеспечивают важнейшую среду обитания для диких животных Севера и снабжение водой отдалённых арктических поселений. Известно, что современное потепление климата в северных широтах планеты, вызывающее снижение прочности мёрзлых грунтов, приводит к нарушению объектов инфраструктуры ресурсодобывающих предприятий в северных регионах, перспективных для добычи углеводородов и других полезных ископаемых.

В условиях климатических изменений арктические озёра играют важную роль в круговороте углерода, выступая интенсивными источниками эмиссии парниковых газов в атмосферу (Serikova et al., 2019; Turetsky et al., 2020; Walter Anthony et al., 2018). Известно (Полищук и др., 2015; Holgerson, Raymond, 2016), что объёмы эмиссии в атмосферу озёрного метана на исследуемой территории определяются суммарной площадью озёр на этой территории. Поэтому в качестве важной с точки зрения оценки объёмов накопления озёрного метана рассматривается задача исследования закономерности распределения численности и площадей термокарстовых озёр по их размерам на различных территориях Арктики. Проведение этих исследований вследствие труднодоступности и высокой степени заболоченности территорий в зонах многолетней мерзлоты в настоящее время требует использования спутниковых снимков. В последние годы дистанционные исследования распределения числа и площадей термокарстовых озёр с использованием спутниковых снимков проведены в Западной Сибири, на Аляске и в других северных регионах (Викторов и др., 2017; Karlsson et al., 2021; Polishchuk et al., 2018; Zabelina et al., 2020).

Большинство из этих исследований распределения озёр выполнены на отдельных, ограниченных по размерам ключевых (тестовых) участках исследуемых территорий, что требует для получения более объективных данных о запасах озёрного метана использования снимков, позволяющих обеспечить полное покрытие всей исследуемой территории. Наиболее удобными для этих целей, по нашему мнению, представляются снимки Sentinel-2, имеющие более широкий охват территории и более высокое пространственное разрешение по сравнению с широко используемыми до последнего времени снимками Landsat. Как показал анализ результатов многочисленных исследований термокарстовых озёр, проведённых в последние десятилетия в циркумполярной арктической зоне (Webb, Liljedahl, 2023), наименее изученными к настоящему времени оказались арктические территории восточной части России. Поэтому для проведения исследований распределения озёр нами выбрана территория Чукотской тундры (ЧТ), расположенная в северной части Чукотского автономного округа.

В связи с этим цель данной работы заключается в экспериментальном изучении распределения числа и площадей озёр по размерам на самой восточной, наименее исследованной арктической территории Российской Арктики — в Чукотской тундре — по спутниковым снимкам Sentinel-2.

Данные и методы исследования

Исследуемая территория Чукотской тундры представляет собой сравнительно однородную по ландшафтно-климатическим и геоэкологическим свойствам область на севере Чукотки. Границы территории исследования показаны на *рис. 1*. Исследуемая территория площадью 308 728 км² простирается примерно на 1200 км с запада на восток и 500 км с севера на юг. Ниже приводится краткая природная характеристика Чукотской тундры.

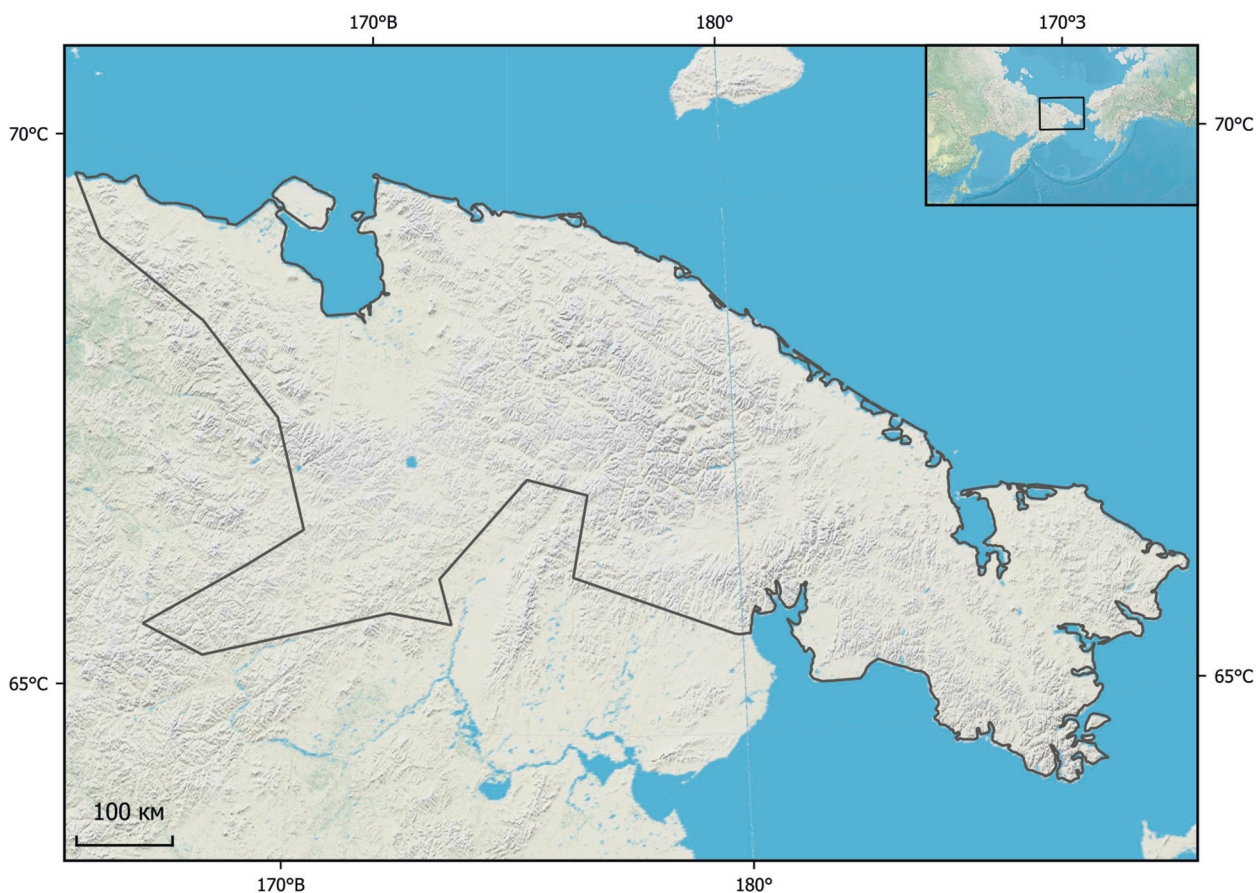


Рис. 1. Местоположение исследуемой территории Чукотской тундры

Согласно энциклопедии (Котляков и др., 2020), территория находится в зоне арктического климатического пояса. Лето короткое, с преобладанием пасмурной погоды. По данным ресурса (Самойлова и др., 2019), средняя температура в августе составляет от 4 °С (в приморских районах) до 10 °С (в континентальных районах), в зимний период — от –16 до –30 °С. Толщина снежного покрова — 60–70 см. На территории исследования широко распространены многолетнемёрзлые породы, достигающие мощности 300–400 м при сравнительно тонком (от 30 до 100 см) слое сезонного протаивания (Самойлова и др., 2019). Территория подстилается непрерывной многолетней мерзлотой, среднегодовая температура грунтов которой, по данным (Котляков и др., 2020), изменяется в пределах от –3 до –7 °С. Согласно ресурсу (Самойлова и др., 2019), годовая сумма осадков колеблется в пределах от 150 до 500 мм. Повсеместно распространены термокарстовые озёра, особенность которых — чрезвычайно широкий диапазон изменений их размеров: от десятков квадратных метров до десятков квадратных километров.

Экспериментальное изучение распределения площадей термокарстовых озёр проведено с использованием космических снимков Sentinel-2 среднего разрешения (20 м) (всего 12 снимков, полученных в период с 2017 по 2021 г.). Обработка изображений, выполненная с помощью стандартных средств геоинформационной системы QGIS 3.22, была направлена на получение данных о числе и площадях озёр на исследуемой территории. Пространственный охват каждого снимка составляет приблизительно 12 тыс. км². Все изображения выбирались в достаточно короткий период летнего сезона (июль–август) для минимизации влияния сезонных колебаний уровня воды в озёрах. В этот период на исследуемой территории исчезает ледовый покров на озёрах, мешающий их выделению при автоматическом дешифрировании снимков. На *рис. 2* представлен для иллюстрации фрагмент снимка Sentinel-2 территории Чукотской тундры.



Рис. 2. Фрагмент космического снимка Sentinel-2, Чукотская тундра, 18.08.2021

В работе использовались изображения со спутника Sentinel-2 уровня обработки L2A (с выполненной атмосферной коррекцией). Определение озёр на снимках проводилось с использованием индекса AWEI (*англ.* Automated Water Extraction Index — автоматизированный индекс выделения воды). Процедура получения данных о пространственных характеристиках озёр выполнялась следующим образом. Для каждого снимка рассчитывался индекс AWEI, после чего визуальным анализом определялось пороговое значение индекса, позволяющее отделять водные объекты от других объектов. С использованием порогового значения проводилась переклассификация растра, в ходе которой все значения, лежащие ниже порогового, отбрасывались. В результате получался растр, ячейки которого содержали информацию только о водных объектах. Полученные растры «сшивались» в мозаику с целью получения единого растрового изображения на всю территорию исследования, на котором исключались области перекрытия соседних растров, сформированных на основе соседних космических снимков. Вследствие автоматического дешифрирования снимков полученная мозаика содержала все водные объекты на территории исследования, в том числе многочисленные реки и ручьи. Последние были удалены с применением маски рек и ручьёв, подготовленной на основе данных из OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org/>).

С использованием мозаики снимков Sentinel-2 территории Чукотской тундры за период 2017–2021 гг. были определены общее число и суммарная площадь всех озёр, дешифрированных по изображениям Sentinel-2. Минимальный размер выделяемых на снимках озёр был выбран равным величине $2 \cdot 10^3 \text{ м}^2$, соответствующей размеру площади 5 пикселей, что позволяет достаточно достоверно выделять водоёмы на снимке. В результате обработки мозаики космических снимков Sentinel-2 средствами QGIS 3.22 были получены векторные слои термокарстовых озёр на территории исследования, позволившие определить число и площади всех озёр крупнее $2 \cdot 10^3 \text{ м}^2$.

Полученные данные были использованы для определения плотности и заозёрности исследуемой территории и построения графиков гистограмм распределения числа и площадей озёр по их размерам. Плотность озёр рассчитывалась как отношение числа озёр к площади территории исследования. Степень заозёрности определялась как отношение суммарной площади озёр к площади исследуемой территории. Гистограммы распределения числа и площадей озёр получены далее путём распределения общего числа озёр и их суммарных площадей на исследуемой территории по частичным интервалам площадей в логарифмическом масштабе (подробно описан в работе (Polishchuk et al., 2018)).

Результаты

Графики гистограмм распределения озёр по размерам на территории Чукотской тундры, представляющие собой зависимости числа и площадей озёр от их размеров в интервале от $2 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^7 \text{ м}^2$, приведены на *рис. 3* (см. с. 209). Крестиками на графике показана гистограмма распределения числа озёр по размерам, а ромбиками — гистограмма распределения площади озёр по размерам.

Как видно из *рис. 3*, график гистограммы распределения числа озёр демонстрирует монотонное сокращение численности водоёмов с ростом их размеров. Однако в поведении этого графика наблюдаются различия в областях малых и больших размеров. Для рассмотрения особенностей изменения числа озёр Чукотской тундры в зависимости от их размеров выделим на оси абсцисс два диапазона:

- 1) менее $2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ (2 га) — малые озёра;
- 2) более $2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ — большие озёра.

В диапазоне больших озёр, обозначенном цифрой 2 на *рис. 3*, график гистограммы показывает взрывной рост числа водоёмов в ЧТ по мере уменьшения их размеров. Так, в этом диапазоне размеров при уменьшении площади озёр приблизительно на два порядка их число возрастает почти в 10 000 раз. А вот в диапазоне малых озёр, обозначенном цифрой 1 на

рис. 3, изменения числа водоёмов в разных интервалах площадей незначительны и слабо зависят от изменения размеров. Общая численность озёр Чукотской тундры с размерами более $2 \cdot 10^3 \text{ м}^2$, определённая по спутниковым данным Sentinel-2, составляет 89 685. Плотность озёр на территории ЧТ, рассчитанная согласно изложенному выше, составляет $0,29 \text{ км}^{-2}$. По данным таблицы, большинство озёр имеет размеры менее $2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ и только треть из них относятся к озёрам больших размеров.

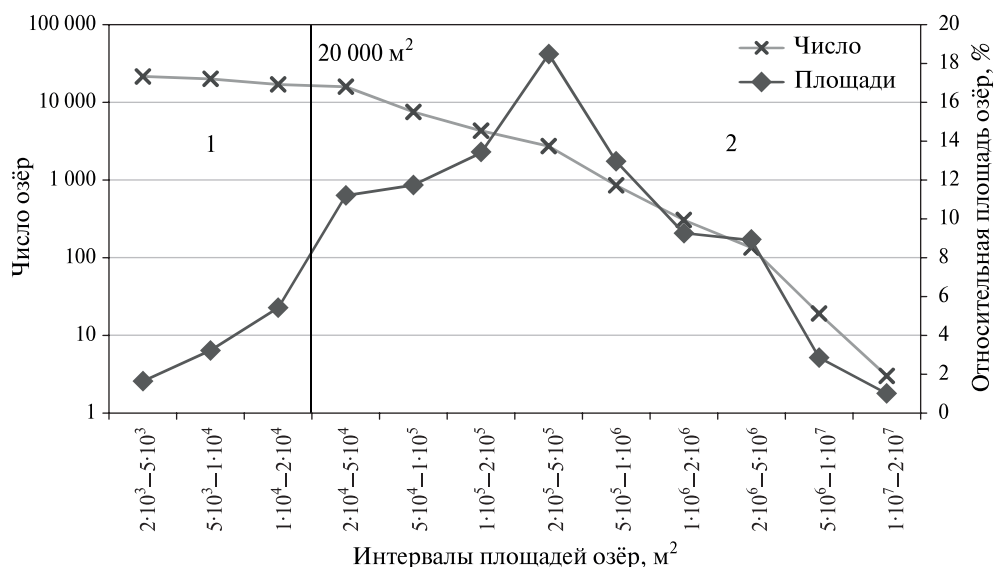


Рис. 3. Гистограммы распределения числа и площади термокарстовых озёр по интервалам их размеров на территории Чукотской тундры по данным со снимков Sentinel-2. Цифрами 1 и 2 обозначены диапазоны размеров озёр: малых и больших соответственно

Распределение общего числа озёр и их суммарной площади по диапазонам размеров

Показатель	Диапазон 1 (< $2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$)	Диапазон 2 (> $2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$)
Число озёр	58 169	31 516
Относительное число озёр, %	65	35
Суммарная площадь озёр, м ²	457 254 168	3 992 802 504
Относительная суммарная площадь, %	10	90

Рассмотрим особенности распределения суммарных площадей арктических озёр Чукотки на основе гистограммы распределения по интервалам размеров (см. рис. 3). Основной вклад в общую площадь озёр дают большие водоёмы, вклад которых, по данным таблицы для диапазона 2, составляет 90 % от общей площади озёр. А если судить по графику гистограммы, около половины суммарной площади озёр формируется водоёмами с размерами 10^5 – 10^6 м^2 . Согласно данным таблицы, вклад малых озёр в общую площадь арктических озёр Чукотки, определяемых по снимкам Sentinel-2, достаточно невелик и не превышает 10 %.

Заметим, что в интервале самых малых размеров озёр ($2 \cdot 10^3$ – $5 \cdot 10^3 \text{ м}^2$) гистограммы на рис. 3 при общем числе водоёмов 21 357 их суммарная площадь составляет пренебрежимо малую величину (всего 1,6 %) от общей площади чукотских озёр. Поэтому в работах, связанных с использованием данных дистанционных исследований для оценки объёмов накопления метана и углекислого газа в озёрах Чукотки и других арктических регионов, достаточно обходиться снимками Sentinel-2, не прибегая к необходимости использования снимков высокого (метрового) разрешения.

Важной характеристикой состояния арктической территории становится степень её озёрности. Рассчитанная как отношение общей площади озёр к площади исследуемой

территории, общая заозёрность территории Чукотской тундры равна 0,014. Заметим, что заозёрность территории ЧТ, согласно работе (Муратов и др., 2023), приблизительно в 7 раз меньше по сравнению с величиной заозёрности территории соседнего арктического региона — Северо-Восточной тундры (север Якутии).

Проведён анализ пространственной неоднородности показателя заозёрности на территории Чукотки. На *рис. 4* представлена карта заозёрности Чукотской тундры, построенная на основе гексагональной сетки. Сетка состоит из 154 ячеек площадью около 2100 км². Степень заозёрности в пределах каждой ячейки рассчитана как отношение суммарной площади попадающих в ячейку озёр к площади ячейки.

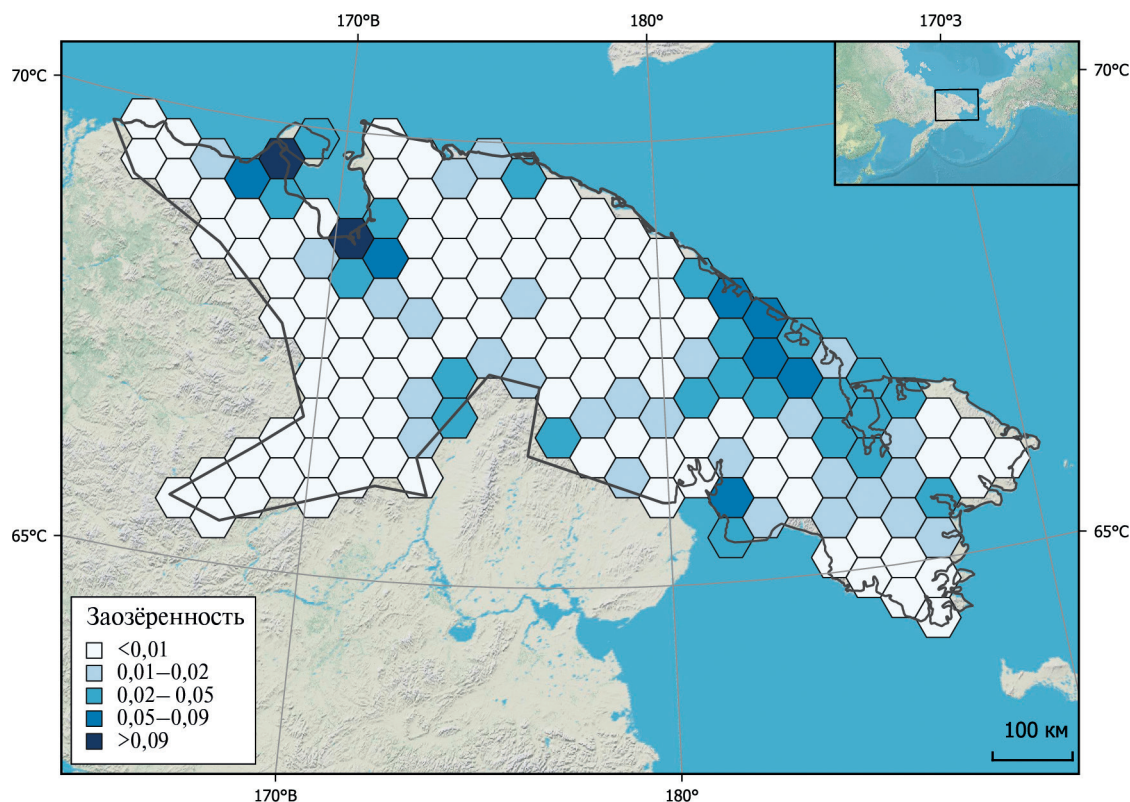


Рис. 4. Карта-схема степени заозёрности территории Чукотской тундры

Как видно из *рис. 4*, показатель заозёрности демонстрирует достаточно высокую степень пространственной неоднородности в пределах изучаемой территории. Карта-схема показывает наличие в районе исследования четырёх участков повышенной заозёрности с величиной более 0,05, суммарная площадь которых равна 16 800 км², что составляет ~5 % территории. Около 15 % территории Чукотской тундры относится к участкам со средней величиной заозёрности (0,02–0,05), а почти две трети имеют крайне низкую степень заозёрности (<0,01).

Заключение и выводы

В статье изложены результаты исследования закономерностей распределения по размерам термокарстовых озёр в тундровой зоне Чукотской Арктики, основанные на спутниковых снимках Sentinel-2 с пространственным разрешением 20 м, полученных в летние месяцы 2017–2021 гг. Дешифрирование озёр на снимках, проведённое с использованием средств геоинформационной системы QGIS 3.22, выявило около 90 тыс. водоёмов на исследуемой территории, размеры которых изменяются в очень широких пределах: от $2 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^7$ м².

Полученные данные позволили определить плотность озёр и степень заозёрности исследованной территории. Показано, что данные параметры территории Чукотской тундры составляют $0,29 \text{ км}^{-2}$ и $0,014$ соответственно.

С использованием данных о числе и площадях озёр получены гистограммы распределения озёр в диапазоне их размеров от $2 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^7 \text{ м}^2$. Анализ гистограммы распределения числа озёр по размерам показал, что более двух третей озёр имеют сравнительно небольшие размеры: от $2 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$. Исследование гистограммы распределения суммарных площадей озёр по интервалам их размеров выявило, что основной вклад в общую площадь озёр Чукотской тундры вносят большие водоёмы с размерами более $2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$. Несмотря на сравнительно небольшую численность таких озёр, их вклад доходит до 90 % от общей площади. Почти половину суммарной площади озёр формируют водоёмы с размерами 10^5 – 10^6 м^2 . А вклад малых озёр (с размерами менее $2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$) в общую площадь арктических озёр Чукотки невелик (не превышает 10 %).

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по проекту № 22-11-20023.

Литература

1. Викторов А. С., Капралова В. Н., Орлов Т. В. и др. Закономерности распределения размеров термокарстовых озёр // Докл. Акад. наук. 2017. Т. 474. № 5. С. 625–627. DOI: 10.7868/S0869565217170212.
2. Котляков В. М., Хаин В. Е., Гуцуляк В. Н., Данилов А. И. Арктика // Большая российская энциклопедия. 2020. <https://old.bigenc.ru/geography/text/3452274> (дата обращения: 15.03.2023).
3. Муратов И. Н., Байсалямова О. А., Полищук Ю. М. Изучение распределения по размерам термокарстовых озёр восточной части Российской Арктики на основе совмещения данных со снимков Sentinel-2 и Канопус-В // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 4. С. 52–59. DOI: 10.31857/S0205961423040061.
4. Полищук Ю. М., Полищук В. Ю., Брыксина Н. А. и др. Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озёрах криолитозоны Западной Сибири // Изв. Томского политех. ун-та. 2015. Т. 326. № 2. С. 12–135.
5. Самойлова Г. С., Горячко М. Д., Бронштейн М. М. Чукотский автономный округ // Большая российская энциклопедия. 2019. <https://old.bigenc.ru/geography/text/5510275> (дата обращения: 15.03.2023).
6. Holgerson M. A., Raymond P. A. Large contribution to inland water CO_2 and CH_4 emissions from very small ponds // Nature Geoscience Letters. 2016. V. 9. P. 222–226. DOI: 10.1038/ngeo2654.
7. Karlsson J., Serikova S., Vorobyev S. et al. Carbon emission from Western Siberian inland waters // Nature Communications. 2021. V. 9. P. 1–8. DOI: 10.1038/s41467-021-21054-1.
8. Polishchuk Y. M., Bogdanov A. N., Muratov I. N. et al. 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. No. 4. Article 045002. 16 p. DOI: 10.1088/1748-9326/aab046.
9. Serikova S., Pokrovsky O. S., Laudon H. et al. High carbon emissions from thermokarst lakes of Western Siberia // Nature Communications. 2019. V. 10. Article 1552. DOI: 10.1038/s41467-019-09592-1.
10. Turetsky M. R., Abbott B. W., Jones M. C. et al. Carbon release through abrupt permafrost thaw // Nature Geoscience. 2020. V. 13. P. 138–143. DOI: 10.1038/s41561-019-0526-0.
11. Walter Anthony K., Schneider T., Nitzte I. et al. 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes // Nature Communications. 2018. V. 9. Article 3262. DOI: 10.1038/s41467-018-05738-9.
12. Webb E. E., Liljedahl A. K. Diminishing lake area across the northern permafrost zone // Nature Geoscience. 2023. V. 16. P. 202–209. DOI: 10.1038/s41561-023-01128-z.
13. Webb E. E., Liljedahl A. K., Cordeiro J. A. et al. Permafrost thaw drives surface water decline across lake-rich regions of the Arctic // Nature Climate Change. 2022. V. 12. P. 841–846. DOI: 10.1038/s41558-022-01455-w.
14. Zabelina S., Shirokova L., Klimov S. et al. Carbon Emission from Thermokarst Lakes in NE European Tundra // Limnology and Oceanography. 2021. V. 66. P. S216–S230. DOI: 10.1002/Ino.11560.

Thermokarst lakes of the Chukchi tundra as observed in Sentinel-2 images

Yu. M. Polishchuk, I. N. Muratov

Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk 628011, Russia
E-mail: yupolishchuk@gmail.com

The article is devoted to remote studies of the characteristics of Arctic thermokarst lakes in the Chukchi tundra. Space images from Sentinel-2 satellites obtained during the summer months of 2017–2021 were used in the research. The lakes were interpreted on the Sentinel-2 satellite image mosaic with the aim to determine the number of lakes and their areas in the study area. The density of lakes and lake coverage on the territory of Chukotka tundra were determined and the values were 0.29 km^{-2} and 0.014, respectively. Histograms of lake distribution in the range of their sizes from $2 \cdot 10^3$ to $2 \cdot 10^7 \text{ m}^2$ in the studied Arctic territory of Chukotka were obtained. The histogram of size distribution of the lakes shows a tendency for the number of lakes to increase as their size decreases, which is evident in similar studies in other regions as well. The histogram of the distribution of total lake areas by intervals of their sizes shows that the main contribution to the total area of lakes is made by large lakes whose contribution reaches 90% of the total area of lakes, while the contribution of small lakes to the total area of Arctic lakes in Chukotka is quite small and does not exceed 10%. The results obtained can be used to assess the volume of greenhouse gas emissions in the territory of Chukotka.

Keywords: permafrost, geographic information systems, satellite images, Arctic tundra, thermokarst lakes, histograms of lake size distribution, Chukchi tundra

Accepted: 05.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-205-213

References

1. Viktorov A. S., Kapralova V. N., Orlov T. V. et al., Regularities in the size distribution of thermokarst lakes, *Doklady Akademii nauk*, 2017, Vol. 474, No. 5, pp. 625–627 (in Russian), DOI: 10.7868/S0869565217170212.
2. Kotlyakov V. M., Khain V. E., Gutsulyak V. N., Danilov A. I., The Arctic, *Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya* (The Great Russian Encyclopedia), 2020 (in Russian), <https://old.bigenc.ru/geography/text/3452274>.
3. Muratov I. N., Baysalamova O. A., Polishchuk Yu. M., Study of the size distribution of thermokarst lakes in the eastern part of the Russian Arctic based on combining Sentinel-2 and Kanopus-V images, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2023, No. 4, pp. 52–59 (in Russian).
4. Polishchuk Yu. M., Polishchuk V. Yu., Bryksina N. A. et al., Methodological issues of estimating methane reserves in small thermokarst lakes in the permafrost zone of Western Siberia, *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, Vol. 326, No. 2, pp. 12–135 (in Russian).
5. Samoilova G. S., Goryachko M. D., Bronstein M. M., Chukotsky autonomus district, *Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya* (The Great Russian Encyclopedia. Electronic version), 2019 (in Russian), <https://bigenc.ru/geography/text/5510275> (in Russian).
6. Holgerson M. A., Raymond P. A., Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds, *Nature Geoscience Letters*, 2016, Vol. 9, pp. 222–226, DOI: 10.1038/ngeo2654.
7. Karlsson J., Serikova S., Vorobyev S. et al., Carbon emission from Western Siberian inland waters, *Nature Communications*, 2021, Vol. 9, pp. 1–8, DOI: 10.1038/s41467-021-21054-1.
8. Polishchuk Y. M., Bogdanov A. N., Muratov I. N. et al., 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, Vol. 13, No. 4, Article 045002, 16 p., DOI: 10.1088/1748-9326/aab046.
9. Serikova S., Pokrovsky O. S., Laudon H. et al., High carbon emissions from thermokarst lakes of Western Siberia, *Nature Communications*, 2019, Vol. 10, Article 1552, DOI: 10.1038/s41467-019-09592-1.
10. Turetsky M. R., Abbott B. W., Jones M. C. et al., Carbon release through abrupt permafrost thaw, *Nature Geoscience*, 2020, Vol. 13, pp. 138–143, DOI: 10.1038/s41561-019-0526-0.
11. Walter Anthony K., Schneider T., Nitze I. et al., 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes, *Nature Communications*, 2018, Vol. 9, Article 3262, DOI: 10.1038/s41467-018-05738-9.

12. Webb E. E., Liljedahl A. K., Diminishing lake area across the northern permafrost zone, *Nature Geoscience*, 2023, Vol. 16, pp. 202–209, DOI: 10.1038/s41561-023-01128-z.
13. Webb E. E., Liljedahl A. K., Cordeiro J. A. et al., Permafrost thaw drives surface water decline across lake-rich regions of the Arctic, *Nature Climate Change*, 2022, Vol. 12, pp. 841–846, DOI: 10.1038/s41558-022-01455-w.
14. Zabelina S., Shirokova L., Klimov S. et al., Carbon Emission from Thermokarst Lakes in NE European Tundra, *Limnology and Oceanography*, 2021, Vol. 66, pp. S216–S230, DOI: 10.1002/Ino.11560.