

И. Н. Муратов, А. Ш. Ибраева, Л. Л. Тимергазина, Ю. М. Полищук

ДИСТАНЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР АРКТИЧЕСКОЙ ТУНДРЫ ТАЙМЫРА

Представлены результаты дистанционного исследования термокарстовых озер в Арктической зоне Таймырской тундры. Исследования проведены на территории площадью 725 тыс. км². В исследованиях использованы спутниковые снимки Sentinel-2, позволившие изучить особенности распределения числа, суммарной площади озер и извилистости их береговых границ. Приведены графики гистограмм распределения численности и суммарных площадей озер в чрезвычайно широком интервале их размеров от 0,2 до 5000 га. Гистограмма распределения озер по размерам демонстрирует значительный рост их численности с уменьшением размеров. Гистограмма распределения суммарных площадей озер по интервалам их размеров показывает, что более 80 % общей площади озер контролируют озера с размерами от 2 до 1000 га. Анализ гистограммы распределения степени извилистости границ озер показал, что большинство озер имеют форму береговых границ, отличающуюся от окружности. Изучена зависимость степени извилистости границ озер от размеров озер и установлен положительный линейный тренд ее изменения с ростом площади озер.

Ключевые слова: термокарстовые озера, Таймыр, Арктическая тундра, Sentinel-2, дистанционные методы, извилистость береговых линий озер.

I. N. Muratov, A. Sh. Ibraeva, L. L. Timergazina, Y. M. Polishchuk

REMOTE STUDY OF THERMOKARST LAKES IN THE ARCTIC TUNDRA OF THE TAIMYR

The results of remote studies of thermokarst lakes in the Arctic zone of the Taimyr tundra are presented. The research was carried out on the territory of 725 thousand km². Sentinel-2 satellite images were used in the studies, which made it possible to study the peculiarities of distribution of the number, total area of the lakes and tortuosity of their coastal borders. Histograms of the distribution of the number and total areas of the lakes in an extra wide range of their sizes from 0.2 to 5000 ha are presented. The histogram of lakes size-distribution demonstrates significant growth of their number with decrease in size. Histogram of the distribution of total areas of lakes by intervals of their sizes shows that more than 80 % of total area of lakes are dominated by lakes with sizes from 2 to 1000 ha. The analysis of the histogram of the degree of tortuosity of lakes borders distribution showed that the majority of lakes have the form of the coastal lines, which differs from a circle. The dependence of the degree of tortuosity of lakes borders on the size of lakes was studied and a positive linear trend of its change with the growth of the area of lakes was established.

Keywords: thermokarst lakes, Taimyr, Arctic tundra, Sentinel-2, remote sensing methods, tortuosity of lakes borders.

Введение

Рост среднегодовой температуры земной поверхности в последние десятилетия приводит к деградации мерзлотных ландшафтов арктических территорий России, перспективных для хозяйственного освоения месторождений углеводородов в ближайшие годы. По оценке экспертов, потепление климата сопровождается ростом экономических и экологических ущербов

предприятий российского нефтегазового комплекса, расположенных в зоне многолетней мерзлоты. Для разработки мероприятий по снижению ущербов необходимо изучение свойств мерзлотных ландшафтов в условиях глобального потепления.

Известно, что наиболее чувствительными к температурным изменениям на территории многолетней мерзлоты оказываются термокарстовые озерные ландшафты. Для дистанционного изучения геокриологических изменений на территориях многолетней мерзлоты по космическим снимкам в качестве индикаторов геокриологических изменений обычно используются термокарстовые озёра, хорошо дешифрируемые на космических изображениях. Согласно [1, 2], таяние мерзлоты в условиях современного потепления климата приводит к ускорению термокарстовых процессов, что сопровождается значительным ростом численности термокарстовых озер малых размеров в зоне мерзлоты.

Доминирующая роль малых термокарстовых озер (площадью менее 0,02–0,05 га) в накоплении озерного метана в зоне вечной мерзлоты была установлена по данным биохимических исследований воды термокарстовых озер Западной Сибири [3]. Традиционно при оценке объемов эмиссии метана и углекислого газа из термокарстовых озер используют данные о свойствах озер, полученные в дистанционных исследованиях по снимкам Landsat (пространственное разрешение 30 м), на которых не видны малые озера. Поэтому вклад миллионов таких озер в глобальный парниковый эффект из-за их небольших размеров обычно не принимается во внимание. Попытки их учета в оценке общего объема мировых запасов метана в [4], основанные на использовании теоретического степенного закона распределения озер по размерам, вызывают сомнения, поскольку степенной закон распределения озер по размерам в широком диапазоне площадей не подтверждается экспериментальными данными [5–9]. В связи с этим важной задачей становится использование снимков более высокого разрешения, например, Sentinel-2, с целью проведения исследований термокарстовых озер в широком диапазоне их размеров, включая и малые озера, что позволило бы учесть вклад большого числа малых термокарстовых озер в общий объем запасов озерного метана на обширных арктических территориях.

Дистанционные исследования параметров термокарстовых озер, проведенные в различных зонах мерзлоты (сплошная, прерывистая и островная) в Западной Сибири и в Европейской части Российской Арктики (на территориях Малоземельской и Большеземельской тундры), показали [8–12], что форма озер проявляет значительную пространственную изменчивость и характеризуется значительной степенью извилистости береговых границ. Извилистость границ озер, как показано в [13,14], приводит к погрешностям дистанционных измерений площадей озер, что оказывает влияние на точность оценки объемов запаса метана в термокарстовых озерах. Поэтому другой важной задачей исследований в настоящей работе является изучение свойств извилистости береговых границ озер.

К настоящему времени обширные дистанционные исследования свойств озер в Арктической зоне проведены на территории Аляски, в Сибири и Скандинавии и в других регионах [15–18], которые показали некоторые особенности пространственной структуры полей термокарстовых озер в различных северных регионах. Так, исследования полей термокарстовых озер, проведенные в Западной и Восточной Сибири [19, 20], выявили существенные различия в их динамике, что делает важным проведение таких исследований на разных территориях российской Арктики с различными географическими и климатическими условиями. Насколько нам известно, аналогичных исследований изменений численности и размеров термокарстовых озер и пространственной изменчивости (извилистости) их береговых границ в Таймырской тундре до сих пор не проводилось. В связи с изложенным выше, целью настоящей работы явилось дистанционное изучение особенностей распределения числа, размеров и степени извилистости береговых границ термокарстовых озер в Арктической зоне Таймырской тундры.

Данные и методы

Исследования термокарстовых озер в настоящей работе проводились в Арктической зоне Таймырской тундры на площади 725 тыс. км². Схема расположения территории исследований в Арктической зоне представлена на рисунке 1. Как видно на рисунке, исследуемая территория Таймырской тундры включает, согласно карте размещения арктических георегионов России [21], две подзоны: Верхняя и Нижняя Арктики. Площадь первой из них составляет 262 тыс. км², площадь второй – 463 тыс. км².

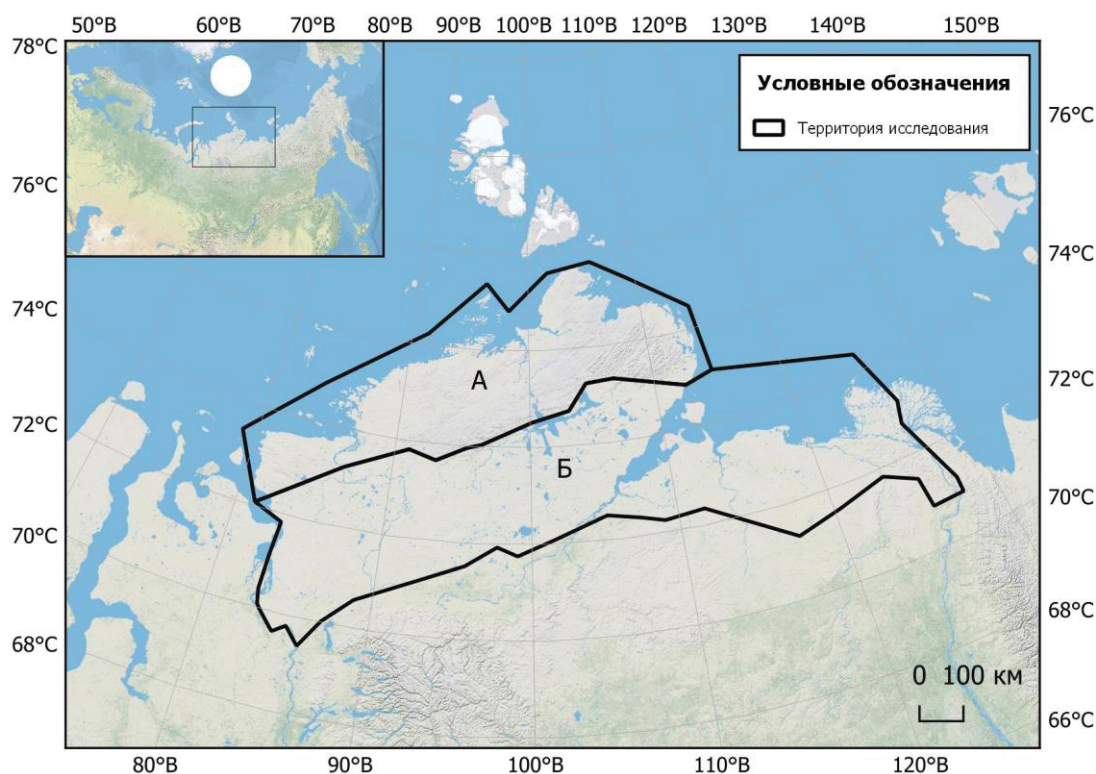


Рисунок 1 – Карта размещения исследуемой территории в Арктической зоне Таймырской тундры. Обозначено: А – подзона Верхней Арктики и Б – подзона Нижней Арктики

Известно, что изображения на снимках Landsat, размер пикселя которых составляет 900 м², позволяют дешифровать озера с минимальными размерами приблизительно 0,5 га. Использование в проведенных исследованиях космических снимков Sentinel-2 с разрешением 20 м (размер пикселей изображения 400 м²), позволило значительно уменьшить минимальные размеры дешифрируемых озер (до 0,2 га) по сравнению со снимками Landsat. Следовательно, применение этих снимков позволяет включать в анализ и озера малых размеров, которые не дешифрируются по снимкам Landsat.

Всего было использовано 81 космических снимков Sentinel-2 (32 и 49 в Верхней и Нижней Арктике, соответственно), полученных в период с 2017 по 2019 г. Обработка космических снимков, проведенная с использованием стандартных средств геоинформационной системы QGIS 3.16 [22], была направлена на получение данных о периметрах и площадях озер на исследуемой территории. Пространственный охват каждого снимка составляет приблизительно 12 тыс. км². Все снимки выбирались в достаточно короткий период летнего сезона (июль – август) для минимизации влияния сезонных колебаний уровня воды в озерах. В этот период на исследуемой территории исчезает ледовый покров на озерах, мешающий их выделению при автоматическом дешифрировании снимков.

В работе использовались снимки со спутника Sentinel-2 уровня обработки L2A с разрешением 20 м и с выполненной атмосферной коррекцией. Определение озер на снимках произво-

дилось с использованием индекса Automated Water Extraction Index (AWEI), который обеспечивает большую эффективность в определении водных объектов, чем широко используемый индекс MNDWI [23]. Индекс AWEI рассчитывается путем комбинирования данных видимого и инфракрасного диапазонов по формуле [23]:

$$AWEI_{sh} = B02 + 2,5 \times B03 - 1,5 \times (B8A + B11) - 0,25 \times B12, \quad (1)$$

где B02, B03 – каналы видимого диапазона; B8A, B11, B12 – каналы инфракрасного диапазона.

Процедура получения данных о пространственных характеристиках озер выполняется в виде последовательности этапов, представленных в виде схемы на рисунке 2. На схеме также показаны информационные ресурсы и программные средства, используемые при выполнении разных этапов. На территорию исследования сформирована коллекция безоблачных космических снимков Sentinel-2, за период с 2017 по 2019 г. Для каждого снимка рассчитывался индекс AWEI, в результате чего получалось новое растровое изображение (растр), каждая ячейка которого содержала значение индекса. Путём визуального анализа определялось пороговое значение индекса, позволяющее разделять водные объекты и объекты суши. С использованием порогового значения проводилась переклассификация растра, в ходе которой все значения, лежащие выше порогового (водные объекты) получали значение 1, а объекты ниже порогового значения получали значение 0. 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.

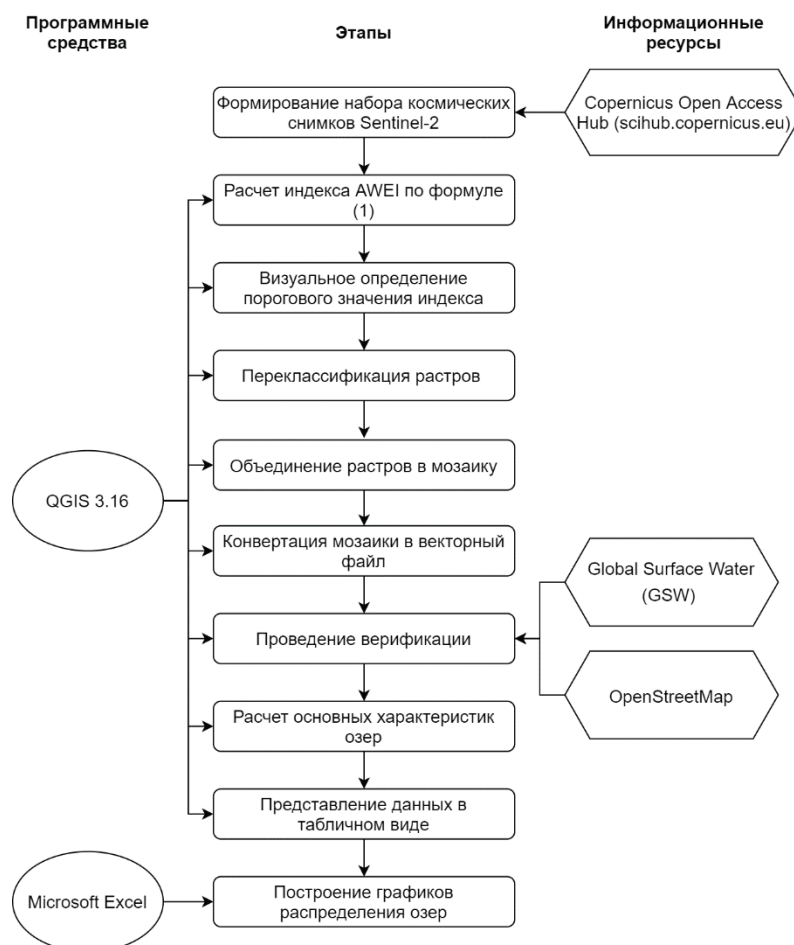


Рисунок 2 – Схема процедуры обработки спутниковых снимков и получения данных о пространственных характеристиках озер

Вследствие автоматического дешифрирования снимков полученная мозаика содержала «ошибки» классификации в виде участков многочисленных рек и ручьев, прибрежных участков моря и др., что потребовало корректировки мозаики. Для удаления ошибочно классифицированных объектов мозаика была конвертирована в векторный файл. Ошибки классификации озер были удалены путем верификации озер с использованием глобальной базы данных о поверхностных водах Global Surface Water (GSW) [24]. База GSW представляет собой результат определения водных объектов на территории всей Земли за 36-летний период с 1984 по 2019 г. на основе снимков Landsat. Для верификации был использован слой Maximum water extent, представляющий водные объекты. В процессе верификации автоматически проводилось сопоставление местоположения озер из мозаики с озерами из GSW. На основании этого сопоставления были удалены ошибочные объекты, местоположение которых не совпадало с данными GSW. Реки и ручьи на мозаике были удалены с использованием маски рек и ручьев, подготовленной на основе данных из OpenStreetMap [25].

Для всех озер были рассчитаны основные характеристики, такие как число озер, периметры и площади и выполнен экспорт в табличные данные. В связи с необходимостью получения распределения площадей озер в достаточно широком диапазоне изменения их размеров (от сотен м² до нескольких га) на основе спутниковых снимков высокого разрешения для построения гистограмм выбраны частичные интервалы с неравномерным шагом (по логарифмическому закону), а именно: 2000–5000 м², 5000–10000 м², 10000–20000 м² и т. д. до нескольких десятков га. Заметим, что такой подход позволил компактно представить графически гистограммы распределения численности озер и их суммарной площади по размерам в достаточно широком диапазоне изменений площадей озер.

Степень извилистости границ озер рассчитывалась по данным спутниковых измерений площади и периметра озер по формуле [8]:

$$z = \frac{p^2}{4\pi s}, \quad (2)$$

где s – площадь; p – периметр озера.

Рассчитанные в соответствии с (2) значения z для каждого озера на всей территории исследования в Арктической тундре Таймыра были применены в дальнейшем для построения гистограмм распределения степени извилистости границ озер и для определения средних значений (z_{cp}), используемых далее для анализа зависимости степени извилистости от размеров и местоположения озер.

Результаты

Для анализа эмпирического распределения численности и суммарных площадей озер по размерам были построены графики гистограмм распределения числа и площадей озер по их размерам, на которых частные интервалы площадей озер даны в логарифмическом масштабе, как описано выше, в связи с необходимостью их компактного графического представления в условиях чрезвычайно широкого диапазона изменения размеров исследованных озер (от тысяч м² до тысяч га). Гистограмма распределения численности озер по их размерам, представленная на рисунке 3, показывает, что с ростом размеров озер наблюдается значительное сокращение их числа.

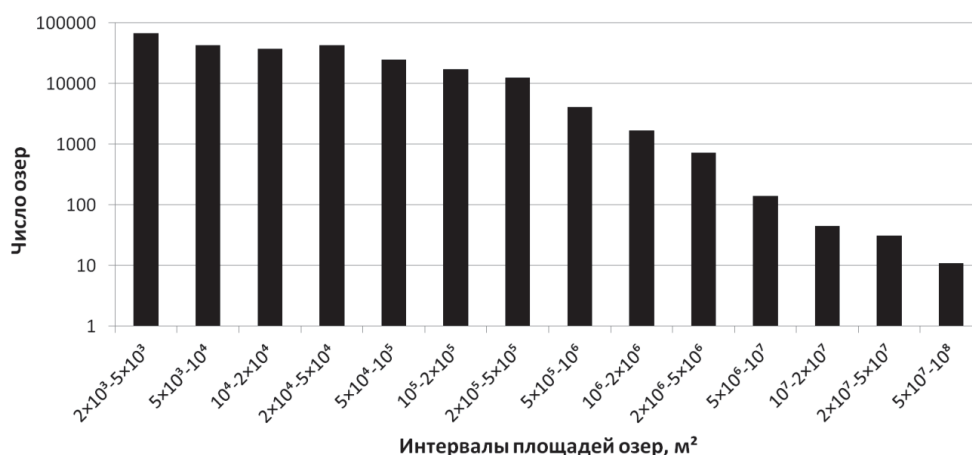


Рисунок 3 – Гистограмма распределения озер по размерам

На рисунке 4 приведен график гистограммы распределения суммарной площади озер по интервалам их размеров, показывающий, что максимальную суммарную площадь водного зеркала имеют озера с размерами 20-50 га. Более 80 % вклада в общую площадь озер в Таймырской Арктике дают озера с размерами от 2 до 1000 га. А вклад всех малых озер с размерами менее 1 га не превышает 3 % от общей площади озер, что показывает незначительность вклада малых озер Таймырской тундры в общую площадь озер, а, следовательно, в эмиссию метана и углекислого газа из арктических озер и в глобальный парниковый эффект.

На рисунке 5 приведена эмпирическая гистограмма распределения степени извилистости границ озер на основе данных о величине z , рассчитанных на основе результатов дистанционных измерений по формуле (2). Гистограмма показывает, что большинство озер Таймырской тундры (90 %) имеют степень извилистости границ, не превышающую 4. Следовательно, форма границ большинства озер значительно отличается от окружности, которой соответствует величина степени извилистости, равная 1.

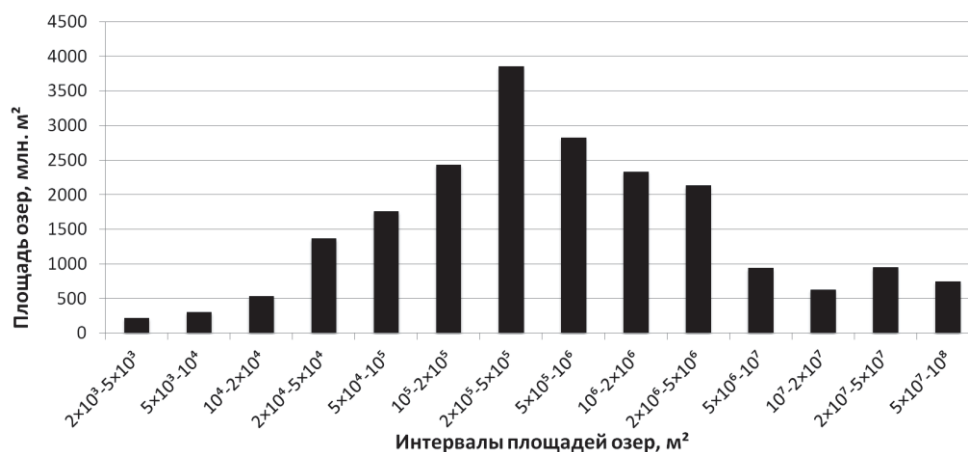


Рисунок 4 – Гистограмма распределения суммарной площади озер по интервалам их размеров



Рисунок 5 – Гистограмма распределения степени извилистости границ озер на исследуемой территории

На рисунке 6 представлен график зависимости средних значений степени извилистости границ озер, рассчитанных для каждого интервала значений степени извилистости, от размеров озер. Заметим, что в связи с необходимостью компактного графического представления этой зависимости в очень широком диапазоне размеров озер по оси абсцисс графика на рисунке 6 использована логарифмическая шкала площадей озер.

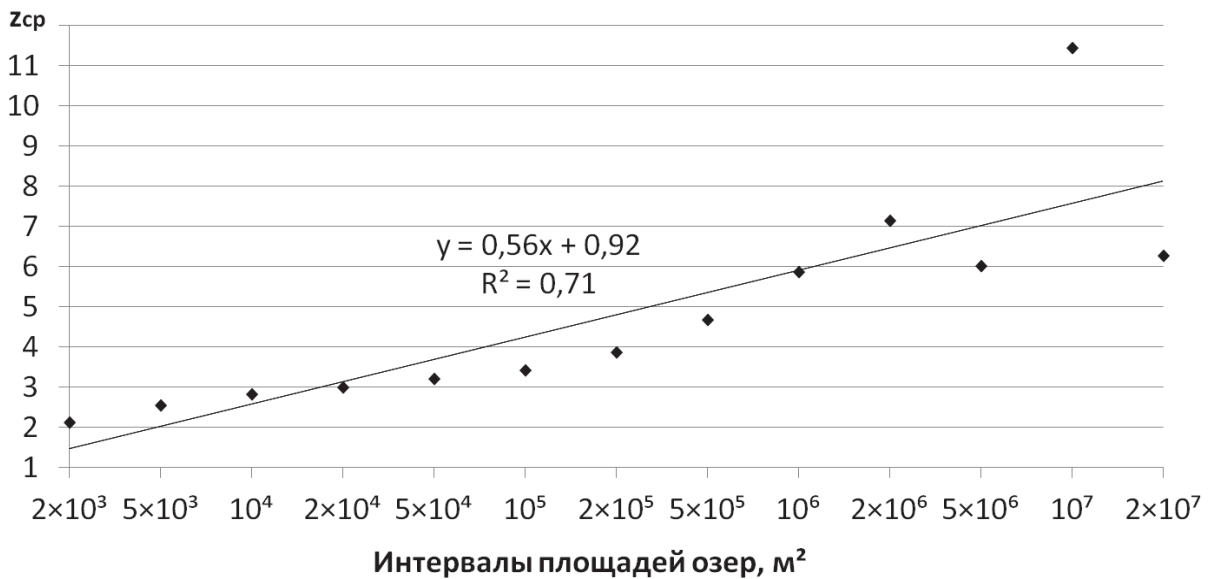


Рисунок 6 – Зависимость среднего значения степени извилистости границ озер от их размеров в Арктической зоне Таймыра

График на рисунке 6 показывает, что зависимость степени извилистости границ озер от площади озер проявляет заметный положительный линейный тренд. Следовательно, степень извилистости береговых линий термокарстовых озер Таймырской тундры существенно зависит от размеров озер и увеличивается с ростом площади озер в интервале от 0,2 до 5000 га в среднем приблизительно в 6 раз, что превышает аналогичную величину, полученную для Западной Сибири [8].

Заключение

Статья посвящена вопросам дистанционного исследования термокарстовых озер, расположенных в Арктической зоне Таймырской тундры. Общая площадь исследуемой территории составила 725 тыс. км². На основе спутниковых снимков Sentinel-2 определена численность озер в интервале их размеров от 0,2 до 5000 га и измерены их площади и периметры, что позволило исследовать особенности распределения числа, суммарной площади озер и степени извилистости их береговых границ.

Проведен анализ гистограмм распределения численности, суммарной площади озер и степени извилистости их береговых границ. Показано, что с уменьшением размеров озер Таймырской арктической тундры наблюдается значительный рост их численности. Гистограмма распределения суммарных площадей озер по интервалам их размеров показывает, что более 80 % вклада в общую площадь водного зеркала дают озера с размерами от 2 до 1000 га, а на долю многочисленных малых озер (с размерами менее 1 га) приходится не более 3 % их суммарной площади.

Исследованы характеристики извилистости береговых границ озер Таймырской Арктики. Анализ гистограммы распределения степени извилистости границ озер показал, что наибольшее число озер имеют форму, отличающуюся от окружности. Изучена зависимость степени извилистости границ озер от размеров озер. Установлено, что с ростом площади озер в среднем степень извилистости береговых линий термокарстовых озер Таймыра увеличивается более чем в 6 раз, что превышает аналогичную величину, полученную для Западной Сибири.

Полученные результаты могут быть использованы в задачах оценки объемов эмиссии метана и углекислого газа из тундровых озер в атмосферу и их вклада в глобальный парниковый эффект, а также в оценке динамики площадей озер и объемов накопления парниковых газов в озерах в условиях современных климатических изменений в Арктике.

Благодарности

Работа проводилась в рамках темы 6.3 по госзаданию Департамента информационных технологий ХМАО на 2021 г. и при поддержке грантов РФФИ № 18-45-860002, № 18-47-700001 и № 19-07-00282.

Литература

1. Polishchuk, Y. M. Remote research of spatiotemporal dynamics of thermokarst lakes fields in Siberian permafrost / Y. M. Polishchuk, I. N. Muratov, V. Y. Polishchuk // *The Arctic: Current Issues and Challenges*. – New York : Nova Science Publishers, 2020. – P. 208–237.
2. Polishchuk, Yu. Remote study of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost / Yu. Polishchuk, S. Kirpotin, N. Bryksina // *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems*. – New York : Nova Science Publishers, 2014. – P. 173–204.
3. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia / O. S. Pokrovsky, L. S. Shirokova, S. N. Kirpotin [et al.] // *Biogeosciences*. – 2011. – V. 8. – P. 565–583.
4. Holgerson, M. A. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds / M. A. Holgerson, P. A. Raymond // *Nature Geosciences Letters*. – 2016. – V. 9. – P. 222–226.
5. Cael, B. B. The size-distribution of Earth's lakes / B. B. Cael, D. A. Seekell // *Scientific Reports*. – 2016. – V. 6. – P. 29633.
6. Полищук, Ю. М. Интеграция космических снимков сверхвысокого и среднего разрешения для построения гистограмм распределения площадей термокарстовых озёр в расширенном диапазоне их размеров / Ю. М. Полищук, А. Н. Богданов, Н. А. Брыксина [и др.]. – Текст : непосредственный // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 38–46.

7. 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 / Y. M. Polishchuk, A. N. Bogdanov, I. N. Muratov [et al.] // *Environmental Research Letters*. – 2018. – V. 13. – P. 1–16.
8. Моделирование полей термокарстовых озер в зоне вечной мерзлоты на основе геоинформационного подхода и спутниковых снимков / В. Ю. Полищук, И. Н. Муратов, М. А. Куприянов [и др.]. – Текст : непосредственный // *Математические заметки Северо-Восточного Федерального университета*. – 2020. – Т. 27, № 1. – С. 101–114.
9. Carbon Emission Related to Thermokarst Processes in Wetlands of NE European Tundra / S. Zabelina, L. Shirokova, S. Klimov [et al.] // *Limnology and Oceanography*. – 2020. – V. 9999. – P. 1–15.
10. Полищук, Ю. М. Исследование извилистости береговых границ термокарстовых озер Западной Сибири по снимкам высокого разрешения «Канопус-В» / Ю. М. Полищук, И. Н. Муратов, В. Ю. Полищук. – Текст : непосредственный // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2019. – № 5. – С. 130–137.
11. Полищук, Ю. М. Дистанционные исследования извилистости береговых границ термокарстовых озёр Большеземельской тундры по снимкам «Канопус-В» / Ю. М. Полищук, И. Н. Муратов, О. А. Байсалямова. – Текст : непосредственный // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 95–101.
12. Муратов, И. Н. Дистанционное исследование термокарстовых озер Малоземельской тундры / И. Н. Муратов, А. Ю. Садыков, Ю. М. Полищук. – Текст : непосредственный // *Доклады Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А. Попова : материалы Международного симпозиума. Серия: Научные Международные симпозиумы. Проблемы экоинформатики / под редакцией Ф. А. Мкртчяна*. – Москва : Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова, 2020. – Вып. 14. – С. 190–194.
13. Accuracy Analysis of Remote Measurement of Thermokarst Lakes Parameters for Field Dynamics Modeling Problems / M. A. Kupriyanov, G. A. Kochergin, I. N. Muratov [et al.] // *Atlantis Press: Advances of Social Science, Education and Humanities Research*. – 2020. – V. 483. – P. 237–241.
14. Куприянов, М. А. Анализ погрешностей дистанционного измерения площади термокарстовых озер Арктики / М. А. Куприянов, Г. А. Кочергин, Ю. М. Полищук // *Доклады Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А. Попова : материалы Международного симпозиума. Серия: Научные Международные симпозиумы. Проблемы экоинформатики / под редакцией Ф. А. Мкртчяна*. – Москва : Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова, 2020. – Вып. 14. – С. 60–64.
15. Kirpotin, S. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting / S. Kirpotin, Y. Polishchuk, N. Bryksina // *International Journal of Environmental Studies*. – 2009. – V. 66, № 4. – P. 423–431.
16. Luoto, M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland / M. Luoto, M. Seppala // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2003. – V. 14. – P. 19–27.
17. Riordan, B. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950-2002 remotely sensed images / B. Riordan, D. Verbyla, A. D. McGuire // *Journal of Geophysical Research*. – 2006. – V. 111. – P. 04002.
18. Zuidhoff, F. S. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalen, Northern Sweden, especially 1960-1997 / F. S. Zuidhoff, E. Kolstrup // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2000. – V. 11. – P. 55–69.
19. Брыксина, Н. А. Сравнительный анализ изменений размеров озер в зоне мерзлоты Западной и Восточной Сибири по космическим снимкам / Н. А. Брыксина, Ю. М. Полищук, М. А. Куприянов. – Текст : непосредственный // *Геоинформатика*. – 2016. – № 1. – С. 64–67.
20. Полищук, Ю. М. Дистанционное изучение ландшафтных и широтных особенностей динамики озер криолитозоны Восточной Сибири по космическим снимкам / Ю. М. Полищук, М. А. Куприянов, Н. А. Брыксина. – Текст : непосредственный // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2014. – Т. 11, № 3. – С. 171–179.

21. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity / D. M. Olson, E. Dinerstein, E. D. Wikramanayake [et al.] // *BioScience*. – 2001. – V. 51. – P. 933–938.

22. Руководство пользователя QGIS. – Текст : электронный // QGIS Documentation. – URL: https://docs.qgis.org/3.16/ru/docs/user_manual/ (дата обращения: 18.02.2021).

23. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery / G. L. Feyisa, H. Meilby, R. Fensholt [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2014. – V. 140. – P. 23–35.

24. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes / J. F. Pekel, A. Cottam, N. Gorelick [et al.] // *Nature*. – 2016. – V. 540. – P. 418–422.

25. О проекте OpenStreetMap. – Текст : электронный // OpenStreetMap. – URL: <https://www.openstreetmap.org/about> (дата обращения: 18.02.2021).