

**ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР
ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ АРКТИКИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Полищук Юрий Михайлович

*доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник Центра космических услуг,
АУ «Югорский НИИ информационных технологий»
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: yupolishchuk@gmail.com*

Куприянов Матвей Андреевич

*главный специалист Центра космических услуг,
АУ «Югорский НИИ информационных технологий»
Ханты-Мансийск, Россия*

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ (проект 22-11-20023)

Предмет исследования: временные ряды изменений площадей термокарстовых озер в Арктике в условиях современных климатических изменений.

Цель работы: проведение анализа временных рядов спутниковых измерений площадей озер для изучения динамики озер Западно-Сибирской Арктики.

Методы и объекты исследования: представлены результаты формирования и анализа временных рядов площадей озер, предназначенных для изучения динамики термокарстовых озер в арктической зоне Западной Сибири за 36-летний период. Временные ряды получены по результатам дистанционных измерений площадей озер на территории площадью 627 тыс. км² с использованием 688 спутниковых снимков Landsat, отобранных в период 1985-2021 гг. Исследуемая территория разделена на три экорегиона для анализа территориальных особенностей обширной арктической зоны Западной Сибири. Анализ временных рядов показал, что изменение средней площади озер на территории арктической зоны Западной Сибири проявляет заметный отрицательный линейный тренд.

Основные результаты исследования: на основе сравнения трендов временных рядов площадей озер на территориях трех экорегионов Западно-Сибирской Арктики установлено, что наибольшую скорость изменений площадей проявляют термокарстовые озера Ямала по сравнению с другими арктическими экорегионами.

Ключевые слова: анализ временных рядов, дистанционные методы, космические снимки, термокарстовые озера, арктические территории, Западная Сибирь

**STUDYING THE DYNAMICS OF THERMOKARST LAKES
IN THE WEST SIBERIAN ARCTIC BASED ON THE ANALYSIS OF TIME SERIES
OF SATELLITE MEASUREMENTS**

Yury M. Polishchuk

*Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Professor
Principal Researcher of the Space Service Center,
Ugra Research Institute of Information Technologies
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: yupolishchuk@gmail.com*

Matvey A. Kupriyanov

Chief Specialist of the Space Service Center,
Ugra Research Institute of Information Technologies
Khanty-Mansiysk, Russia

Supported by grants: Russian Science Foundation (project 22-11-20023).

Subject of research: article is the time series of changes in the area of thermokarst lakes in the Arctic under the conditions of modern climatic changes.

Purpose of research: to analyze the time series of satellite measurements of lake areas for studying the dynamics of lakes in the West Siberian Arctic.

Methods and objects of research: we present the results of formation and analysis of time series of lake areas intended for studying the dynamics of thermokarst lakes in the Arctic zone of Western Siberia over a 36-year period. The time series were obtained based on the results of remote measurements of the lake areas on the territory of 627 thousand km² using 688 Landsat satellite images, sampled in the period 1985-2021. The study area was divided into three ecoregions to analyze the territorial features of the vast Arctic zone of Western Siberia. The analysis of the time series showed that the change in the average lake area in the territory of the Arctic zone of Western Siberia exhibits a marked negative linear trend.

Main results of research: based on the comparison of the trends in the time series of lake areas in the territories of the three ecoregions of the West Siberian Arctic, it was found that the thermokarst lakes of Yamal exhibit the highest rate of change in the areas compared to the other Arctic ecoregions.

Keywords: time series analysis, remote sensing methods, satellite images, thermokarst lakes, Arctic territories, Western Siberia.

Введение

Повышение 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. 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. Традиционно в исследованиях динамики термокарстовых озёр используют данные о свойствах озёр, полученные в дистанционных исследованиях по снимкам Landsat (пространственное разрешение 30 м), по которым накоплены многолетние архивы, удобные для исследования многолетней динамики озёр.

К настоящему времени обширные дистанционные исследования свойств озёр в Арктической зоне проведены на территории Аляски, в Сибири, в Скандинавии и в других регионах [1–5], которые показали некоторые особенности динамики полей термокарстовых озёр в различных северных регионах. Проведенные ранее исследования динамики озёр Западной Сибири относятся к периоду 1973–2008 гг. [6]. Поэтому важной задачей современных исследований динамики озёр в условиях климатических изменений на этой территории становится

проведение дистанционных исследований, направленных на получение новых данных о динамике площадей озер с использованием спутниковых снимков последнего десятилетия.

В связи с изложенным выше, целью настоящей работы явилось дистанционное изучение динамики термокарстовых озер в Арктической зоне Западной Сибири с использованием спутниковых снимков Landsat, полученных в период 1985–2021 гг.

Результаты и обсуждение

Спутниковые измерения площадей термокарстовых озер в арктической зоне Западной Сибири в настоящей работе проводились на территории исследований на площади 627 тыс. км², на которой были выбраны 29 тестовых участков (ТУ). Схема расположения ТУ на территории исследований представлена на рисунке 1. Как видно на рисунке, исследуемая территория разделена на три однородных по природным условиям свойствам области, называемые далее, в соответствии с [7], арктическими экорегионами, к которым будем относить территории на полуостровах Ямал и Гыдан и в южной части Западно-Сибирской Арктики. Площадь первой из них составляет 99 тыс. км², площади второй и третьей – 160 и 368 тыс. км² соответственно.

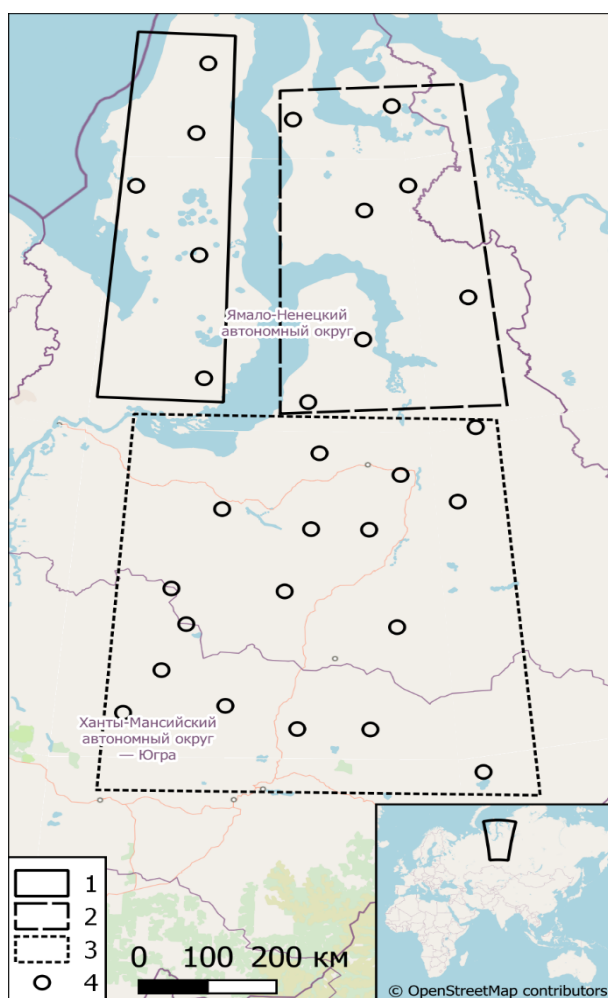


Рисунок 1 – Карта размещения тестовых участков на исследуемой территории в арктической зоне Западной Сибири. Обозначено: 1 – Ямальская тундра, 2 – Гыданская тундра, 3 – южная часть Западно-Сибирской Арктики, 4 – местоположение тестовых участков

Приведём далее краткое описание природных условий исследуемой территории Западно-Сибирской Арктики (ЗСА) на основе [8]. Территории исследований на Ямале и Гыдане, расположенные в Ямало-Ненецком автономном округе в основном за Северным полярным кругом, находятся в зоне сплошного распространения мерзлоты. Поэтому здесь повсеместно

распространена многолетняя мерзлота с множеством термокарстовых озёр и болот. На территории этих экорегионов преобладают арктические, мохово-лишайниковые и кустарничковые тундры, которые сменяются к югу лесотундровым редколесьем [8].

Протяженность исследованной территории на Ямале составляет около 700 км в направлении с севера на юг и 240 км с запада на восток, а в Гыданском экорегионе приблизительно 400 км в обоих направлениях. Поверхность в экорегионе Ямала равнинная (высота от 50 до 85 м) и подстилается в основном песчано-глинистыми, моренными и ледниковыми отложениями. А на Гыдане преобладают плоские заболоченные холмисто-моренные низменности и равнины, которые поднимаются к западу (Юрибейская возвышенность) и к югу (Танамская возвышенность) до 150 м в высоту.

Территория исследований в экорегионе южной части Западно-Сибирской Арктики (далее ЮгЗСА) имеет преимущественно равнинный характер и располагается в зонах прерывистой и островной мерзлоты с большой численностью термокарстовых озер. На севере этой территории преобладают ландшафты лиственничной лесотундры, переходящие к югу в северную тайгу.

Для проведения исследования использовались данные, полученные с космических аппаратов Landsat 4, 5, 7 и 8. При разрешающей способности спутниковых снимков этих аппаратов 30 м размер пикселя на снимках составляет 900 м^2 , что позволяют достаточно уверенно дешифрировать озера с минимальными размерами приблизительно 0,5 га. Всего было использовано 688 космических снимков Landsat, в том числе 100 и 182 в экорегионах Ямала и Гыдана соответственно и 443 в экорегионе ЮгЗСА, полученных в период с 1985 по 2021 гг. Обработка космических снимков, проведенная с использованием стандартных средств геоинформационной системы QGIS 3.22 [9], была направлена на получение данных о площадях и количестве озер на исследуемой территории. Пространственный охват каждого снимка составляет приблизительно 10 тыс. км^2 . 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 Landsat уровня обработки L1TP с разрешением 30 м. Определение озер на снимках производилось с использованием индекса NDWI [10], который рассчитывается путем комбинирования данных видимого и инфракрасного диапазонов по формуле:

$$\text{NDWI} = \left(\frac{\text{green} - \text{NIR}}{\text{green} + \text{NIR}} + \frac{\text{green} - \text{SWIR1}}{\text{green} + \text{SWIR1}} \right) \times \frac{1}{2}, \quad (1)$$

где *green* – 3-й канал Landsat 8 и 2-й канал Landsat 4, 5, 7;

NIR – 5-й канал Landsat 8 и 4-й канал Landsat 4, 5, 7;

SWIR1 – 6-й канал Landsat 8 и 5-й канал Landsat 4, 5, 7.

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 Landsat 4, 5, 7, 8 за 36-летний период. Для каждого снимка производилась предварительная обработка, как указано в [11], рассчитывался индекс NDWI. В результате было получено 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 бинарная классификация растра, в ходе которой все значения, лежащие выше порогового (водные объекты), получали значение 1, а объекты ниже порогового уровня получали значение 0. В результате получался новый растр, ячейки которого содержали информацию только о водных объектах.

Попавшие в выборку реки и ручьи были удалены с использованием векторной маски, которая создавалась в процессе визуальной проверки данных. На каждом тестовом участке были рассчитаны число озер и их площади и выполнен экспорт в табличные данные.

Рассчитанные значения площади озер для каждого озера на всей территории исследования были применены в дальнейшем для формирования временных рядов усредненных (по всем тестовым участкам для каждого года исследования) значений площади озер, используемых далее для установления трендов динамики площади озер как в отдельных экорегионах, так и на всей территории исследования в Западно-Сибирской Арктике.

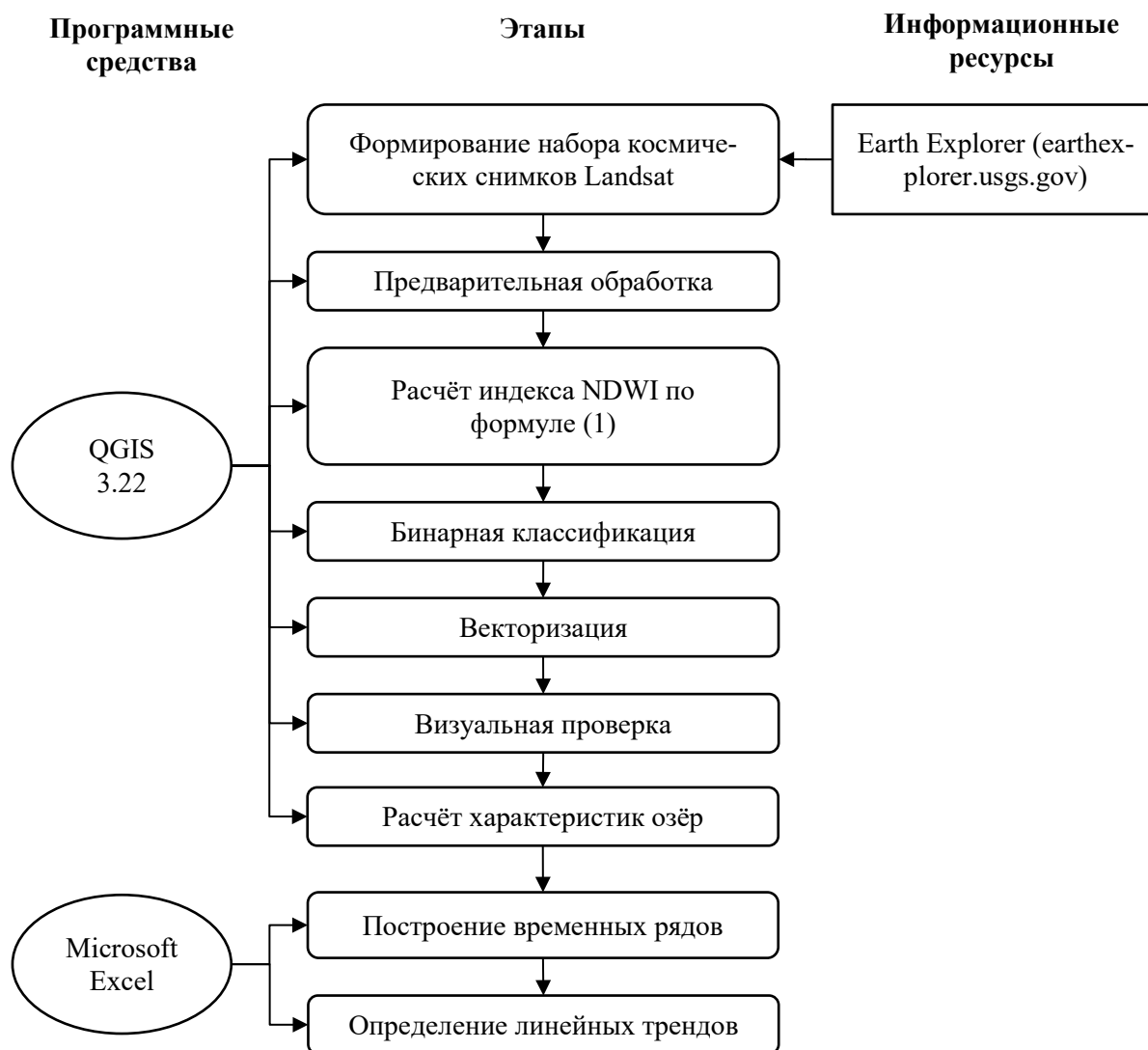


Рисунок 2 – Схема последовательности этапов обработки и анализа данных снимков Landsat

Временной ряд средних значений площадей озер аппроксимировался линейным уравнением вида:

$$y = ax + b, \quad (2)$$

где y – средняя площадь озера (га); a – линейный коэффициент уравнения аппроксимации; x – время (годы); b – свободный член уравнения аппроксимации.

В таблице 1 дана общая характеристика проведенных исследований

Таблица 1 – Общая характеристика проведенных исследований

Территория	Ямал	Гыдан	ЮгЗСА	ЗСА
Площадь, тыс. км ²	99	160	368	627
Количество снимков, шт.	100	182	443	688
Суммарное число озёр, шт.	5 966	13 153	69 868	88 987
Количество ТУ, шт.	5	7	17	29

На рисунке 3 представлен в графическом виде временной ряд средних (по всем тестовым участкам за каждый год) значений площади озер на территории исследований в Западно-Сибирской Арктике, рассчитанных как отношение суммы средних (по тестовым участкам) площадей озер к общему числу ТУ, имевшихся в каждый конкретный год. Заметим, что число ТУ, для которых были получены безоблачные снимки, оказалось различным в разные годы из-за отсутствия (в периоды пасмурной погоды) таких снимков. В отдельные годы для некоторых ТУ вообще не удалось собрать безоблачные снимки, что проявилось в виде пропусков данных во временном ряде средних значений площадей озер, в частности в 2003–2005, 2008 и 2012 гг. (рисунок 3).

Как видно из рисунка 3, временной ряд средних значений площади озер показывает отрицательный линейный тренд, что иллюстрируется пунктирной линией на графике. Это демонстрирует тенденцию сокращения во времени площади озер в Западно-Сибирской Арктике в период 1985–2021 гг. Заметим, что эта же тенденция сокращения в среднем площадей озер на этой территории наблюдалась, по данным [6], и в более ранний период исследований 1973–2008 гг.

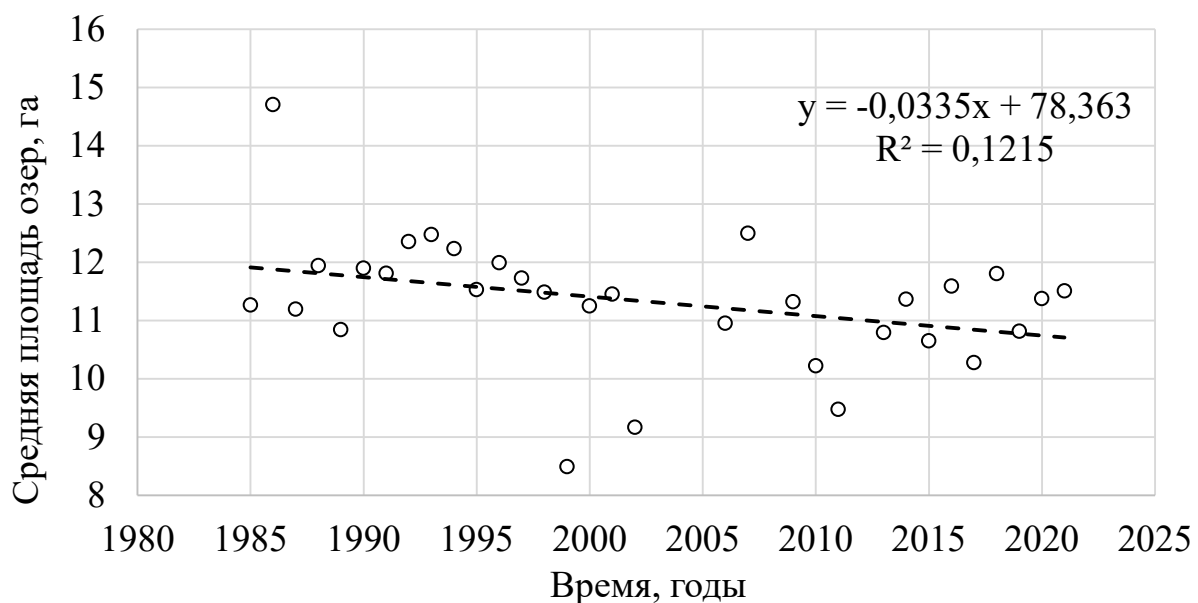


Рисунок 3 – График временного хода среднего значения площади озер на всей территории исследований в Арктической зоне Западной Сибири

Для изучения особенностей динамики площадей озер на территориях в разных экорегионах Западной Сибири на рисунке 4 представлены в графическом виде временные ряды данных о средней площади озер для трех разных экорегионов Западно-Сибирской Арктики. Аппроксимация временных рядов, проведенная в соответствии с (2), позволила определить линейные тренды изменений площади озер в разных экорегионах, отображаемые на рисунке 4 прямыми линиями (сплошной – для Ямала, крупной штриховкой – для южной части ЗСА, мелкой штриховкой – для Гыдана).

Как видно из рисунка 4, изменение средней площади озер на территориях всех трех экорегионов проявляет заметный отрицательный линейный тренд, как и на рисунке 3 для всей территории ЗСА. Найденные, согласно (2), коэффициенты уравнения аппроксимации

для проанализированных в статье временных рядов представлены в таблице 2. Из сравнения данных рисунка 4 о площадях озер следует важный вывод о том, что в среднем более крупные по размерам озера располагаются на территории Ямала, а более мелкие – на Гыдане. Здесь следует заметить, что несмотря на расположение этих соседних территорий в одном широтном поясе, термокарстовые процессы в условиях современного глобального потепления климата протекают на разных территориях различным образом.

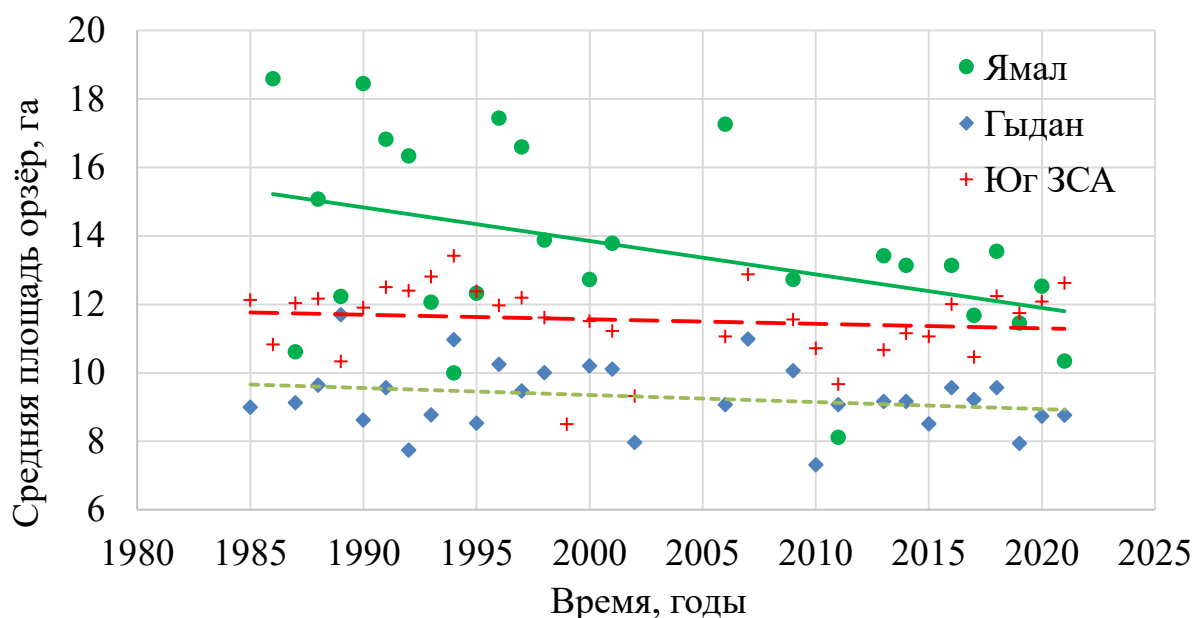


Рисунок 4 – График временного хода среднего значения площади озер в трех различных экорегионах Арктической зоны Западной Сибири

Таблица 2 – Величины коэффициентов уравнения аппроксимации (2) для временных рядов площади озер в разных экорегионах Западно-Сибирской Арктики

Территория	Ямал	Гыдан	Юг ЗСА	ЗСА
Линейный коэффициент a	-0,098	-0,020	-0,013	-0,034
Свободный член уравнения b	209,56	50,12	38,41	78,36

Анализ данных Таблицы 2 показывает, что озера Ямала имеют наибольшую величину коэффициента линейного тренда. Следовательно, можно сделать вывод о том, что термокарстовые озера Ямала проявляют более высокую временную динамику по сравнению с другими экорегионами ЗСА. В наглядном виде это демонстрируют углы наклона линий тренда к оси абсцисс, представленных на графике на рисунке 4. Этот результат можно интерпретировать как значительно более сильное проявление влияния потепления климата последних десятилетий на динамику озер на Ямале, чем на территории двух других экорегионов ЗСА.

Заключение и выводы

По результатам проведенных исследований динамики термокарстовых озер на основе анализа временных рядов их площадей показано, что в среднем площади озер на территории всех арктических экорегионов Западной Сибири сокращаются со временем, что является проявлением глобального потепления последних десятилетий.

Установлено, что в среднем более крупные по размерам озера располагаются на территории Ямала, а более мелкие – на Гыдане. Следовательно, несмотря на расположение этих соседних арктических территорий в одном широтном поясе, термокарстовые процессы в условиях воздействия климатических изменений протекают различным образом на разных

арктических территориях. Однако объяснение этого факта требует дополнительных геокриологических исследований, что не входит в рамки данной публикации.

Проведенные исследования динамики термокарстовых озер в арктической зоне Западной Сибири показывают, что озера Ямала проявляют более высокий темп временных изменений (более высокую динамику) по сравнению с озерами Гыдана и южной части Западно-Сибирской Арктики. Этот результат можно интерпретировать как значительно более сильное проявление влияния потепления климата на динамику озер на Ямале, чем на территории других арктических экорегионов Западной Сибири.

Результаты исследований динамики площадей озер, полученные в статье, могут быть использованы в задачах оценки и прогноза динамики объемов эмиссии метана и углекислого газа из термокарстовых озер арктической зоны Западной Сибири в атмосферу, а также для оценки их вклада в глобальный парниковый эффект в условиях современных климатических изменений в Арктике.

Литература

1. Carbon Emission Related to Thermokarst Processes in Wetlands of NE European Tundra / S. Zabelina, L. Shirokova, S. Klimov [et al.]. – DOI:10.1002/Ino.11560 // *Limnology and Oceanography*. – 2020. – Vol. 9999. – P. 1–15.
2. 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. – Vol. 66, №. 4. – P. 423–431.
3. Riordan, B. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950-2002 remotely sensed images / B. Riordan, D. Verbyla, A. D. Guire // *Journal of Geophysical Research*. – 2006. – Vol. 111. – G04002.
4. 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. – Vol. 11. – P. 55–69.
5. 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* / eds. O. Pokrovsky, S. Kirpotin, A. Malov. – New York : Nova Science Publishers, 2020. – Chapter 8. – P. 208–237.
6. Полищук, В. Ю. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты / В. Ю. Полищук, Ю. М. Полищук. – Ханты-Мансийск : УИП ЮГУ, 2013. – 129. – Текст : непосредственный.
7. 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.]. – DOI:10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2 // *BioScience*. – 2001. – Vol. 51. – P. 933–938.
8. Ямал. – Текст : электронный // Большая российская энциклопедия. – 2020. – URL: <https://bigenc.ru/geography/text/4926334> (дата обращения: 19.06.2022).
9. Руководство пользователя QGIS. – Текст : электронный // Документация QGIS 3.22. – URL: https://docs.qgis.org/3.22/ru/docs/user_manual/index.html (дата обращения: 19.06.2022).
10. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery / G. L. Feyisa, H. Meilby, R. Fensholt, S. R. Proud // *Remote Sensing of Environment*. – 2014. – Vol. 140. – P. 23–35.
11. Using the USGS Landsat Level-1 Data Product. Conversion to TOA Reflectance // USGS: science for a changing World. – URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product> (date of application: 19.06.2022).