

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ТЕРМОКАРСТОВЫЕ ОЗЕРА ТАЕЖНОЙ И ТУНДРОВОЙ ЗОН СИБИРСКОЙ АРКТИКИ ПО СНИМКАМ КАНОПУС-В И SENTINEL-2

© 2024 г. И. Н. Муратов¹, Ю. М. Полищук¹, *

¹Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий,

Ханты-Мансийск, Россия

*E-mail: yu.polishchuk@gmail.com

Поступила в редакцию 18.04.2024 г.

Исследованы закономерности распределения по размерам термокарстовых озер в тундровой и таежной арктических зонах северо-востока Сибири на основе космических снимков с аппаратов Канопус-В и Sentinel-2 (с пространственным разрешением 2.1 и 20 м соответственно), полученных в летние месяцы 2017–2021 гг. Дешифрирование озер проведено на мозаике спутниковых снимков Sentinel-2 и на 16 тестовых участках на снимках Канопус-В с целью определения численности озер и их площадей на территории каждой из указанных зон. На основе объединения (интеграции) данных со снимков различного пространственного разрешения получены экспериментальные гистограммы распределения числа и суммарных площадей озер по их размерам для исследованных тундровой и таежной зон в чрезвычайно широком диапазоне размеров озер от 50 до 10^8 м². Графики гистограмм распределения числа озер по размерам демонстрируют сходный характер поведения в обеих зонах, проявляющийся в росте числа озер по мере уменьшения их размеров. Показано, что основной вклад в общую площадь озер дают большие озера (более 200 000 м²), доля которых превышает 80% от общей площади озер (в тундре 82%, в таежной зоне 85%). Вклад малых озер (менее 500 м²) в общую площадь арктических озер как в тундровой, так и в таежной зонах пренебрежимо мал и не превышает 0.20 и 0.17% соответственно. Исследованы характеристики плотности озер и степени заозеренности исследованных территорий. Показано, что заозеренность и плотность озер в тундре в 1.9 и 2.5 раза соответственно превышают их величины в таежной зоне.

Ключевые слова: термокарстовые озера, многолетняя мерзлота, арктическая тундра, космические снимки, геоинформационные системы, гистограммы распределения озер по размерам, Российская Арктика

DOI: 10.31857/S0205961424060047, **EDN:** RQSSHY

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время пристальное внимание специалистов, занимающихся дистанционными исследованиями в Арктике, привлекают термокарстовые озера, являющиеся интенсивными источниками эмиссии в атмосферу парниковых газов (ПГ) и особенно природного метана (Pokrovsky et al., 2011; Messenger et al., 2016; Holgerson and Raymond, 2016; Serikova et al., 2019; Zabelina et al., 2020). В последние годы проведены дистанционные исследования динамики и распределения числа и площадей термокарстовых озер в Сибири и в других северных регионах (Кравцова, Родионова, 2016; Полищук и др., 2018; Veremeeva et al., 2021; Webb and Liljedahl, 2022).

Исследования распределения озер в восточной части Российской Арктики, например, (Викторов и др., 2017) выполнены на отдельных ограниченных по размерам ключевых (тестовых) участках с использованием в большинстве случаев спутни-

ковых снимков среднего разрешения. Такие снимки Landsat (разрешение 30 м) обеспечивают многократное полное покрытие земного шара, но на них не обнаруживаются озера малых размеров. Поэтому полученные по этим снимкам эмпирические распределения площадей озер не учитывают вклад малых термокарстовых озер, концентрация метана в которых, согласно (Pokrovsky et al., 2011; Holgerson and Raymond, 2016), более чем на порядок превышает его концентрацию в озерах с размерами более 10^3 м². В связи с этим возникла необходимость объединения данных о численности и площадях озер, получаемых со спутников как среднего, так и высокого/сверхвысокого разрешений.

Методика объединения (интеграции) данных со спутников различного разрешения для построения гистограмм распределения озер по размерам разработана в (Полищук и др., 2018). С использованием этой методики в (Муратов и др., 2023) получены по снимкам Sentinel-2 и Канопус-В гистограммы рас-

пределения числа озер по размерам в тундровых зонах северо-востока Сибири и Чукотки в очень широком диапазоне размеров озер от 50 до 10^8 м². Проведенный в (Муратов и др., 2023) анализ гистограмм позволил выявить особенности пространственной структуры полей термокарстовых озер в разных зонах арктической тундры северо-восточной России. В частности, показано, что основной вклад в численность озер Северо-восточной тундры дают значительно более крупные озера, чем в Чукотской тундре, в которой преобладают малые озера. При этом установлено, что заозеренность территории Северо-восточной тундры в 7 раз выше, чем на исследованной территории Чукотки, что может рассматриваться как свидетельство значительных различий геоэкологических условий на разных арктических территориях тундры Российского востока. Однако аналогичных исследований, направленных на выявление особенностей термокарстовых озер таежной зоны по сравнению с тундровыми озерами, насколько нам известно, выполнено не было.

Так как объемы эмиссии в атмосферу озерного метана на исследуемой территории определяются, согласно (Holgersen and Raymond, 2016; Полищук и др., 2015), суммарной площадью озер на этой территории, важной с точки зрения получения оценок запасов озерного метана рассматривается задача исследования распределения суммарных площадей термокарстовых озер по их размерам. С использованием указанной выше методики объединения данных со снимков среднего и высокого разрешения для учета многочисленных малых озер получены оценки запасов метана и углекислого газа в термокарстовых озерах на территориях Западно-Сибирской Арктики (Polishchuk et al., 2018) и северо-востока Европейской части Российской Арктики (Zabelina et al., 2020). Однако аналогичные оценки запасов ПГ в термокарстовых озерах на территории восточной части Российской Арктики, включающей наряду с тундровой зоной и более обширную по площади таежную зону, не могут быть получены из-за отсутствия в настоящее время знаний о распределении площадей озер по размерам на территории указанных зон.

В связи с этим целью данной работы является экспериментальное исследование особенностей распределения площадей и числа термокарстовых озер на территориях тундровой и таежной зон северо-востока Сибирской Арктики с использованием спутниковых снимков Sentinel-2 и Канопус-В.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ТЕРРИТОРИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Исследуемая территория площадью 673 962 км² простирается примерно на 1200 км с запада на восток и 800 км с севера на юг. Согласно (Гаври-

лов А.В., Замолотчикова, 1989), территория располагается в зонах арктического и субарктического климатических поясов. Годовая сумма осадков колеблется от 150 до 350 мм. Территория подстилается непрерывной вечной мерзлотой. Широко распространены многолетнемерзлые породы, достигающие на северо-востоке Якутии наибольшей (до 500 м) мощности при сравнительно тонком (от 30 до 100 см) слое сезонного протаивания. На территории исследования повсеместно распространены термокарстовые озера разного возраста, размеры которых изменяются в широких пределах (Кравцова, Родионова, 2016).

Для проведения исследований выбран район на северо-востоке Сибири, включающий территории двух арктических экорегионов, в терминологии (Olson et al., 2001): Северо-восточной тундры и Северо-восточной тайги. В пределах этих экорегионов выделены две относительно однородные в эколого-ландшафтном отношении территории, называемые здесь и далее тундровой и таежной зонами. На рис. 1 с использованием фрагмента карты эколого-ландшафтного районирования по (Olson et al., 2001) показаны границы исследуемых тундровой и таежной зон, в пределах которых расположены 16 тестовых участков, размещенных по-разному в каждой зоне.

Границы тундровой и таежной зон на рис. 1 определены на основе совместного пространственного анализа картографических материалов ландшафтного, экологического и мерзлотного районирования исследуемой территории (Olson et al., 2001; Гудилин, 1987; Федоров и др., 2018) северо-востока Сибири, проведенного с использованием средств геоинформационной системы QGIS 3.2. Исследуемая территория ограничивается с севера береговой границей Северного ледовитого океана, с востока — административной границей Якутии, а ее западная и южная границы определены, как показано на картосхеме (рис. 1), путем максимально возможного исключения участков горных территорий (горной тундры), где господствует гольцовый пояс с развитыми склоновыми процессами, не способствующими формированию условий для развития термокарстовых процессов и образования термокарстовых озер.

Таблица 1, в которой приведены величины площади тундровой и таежной зон и составляющих их подзон, согласно рис. 1, показывает, что включенные в них участки горной тундры относительно невелики и составляют 13 и 10% соответственно. Поэтому можно предполагать, что учет небольшого числа озер на включенных участках горной тундры не окажет существенного влияния на результаты сравнительного анализа распределения озер в тундровой и таежной зонах северо-востока

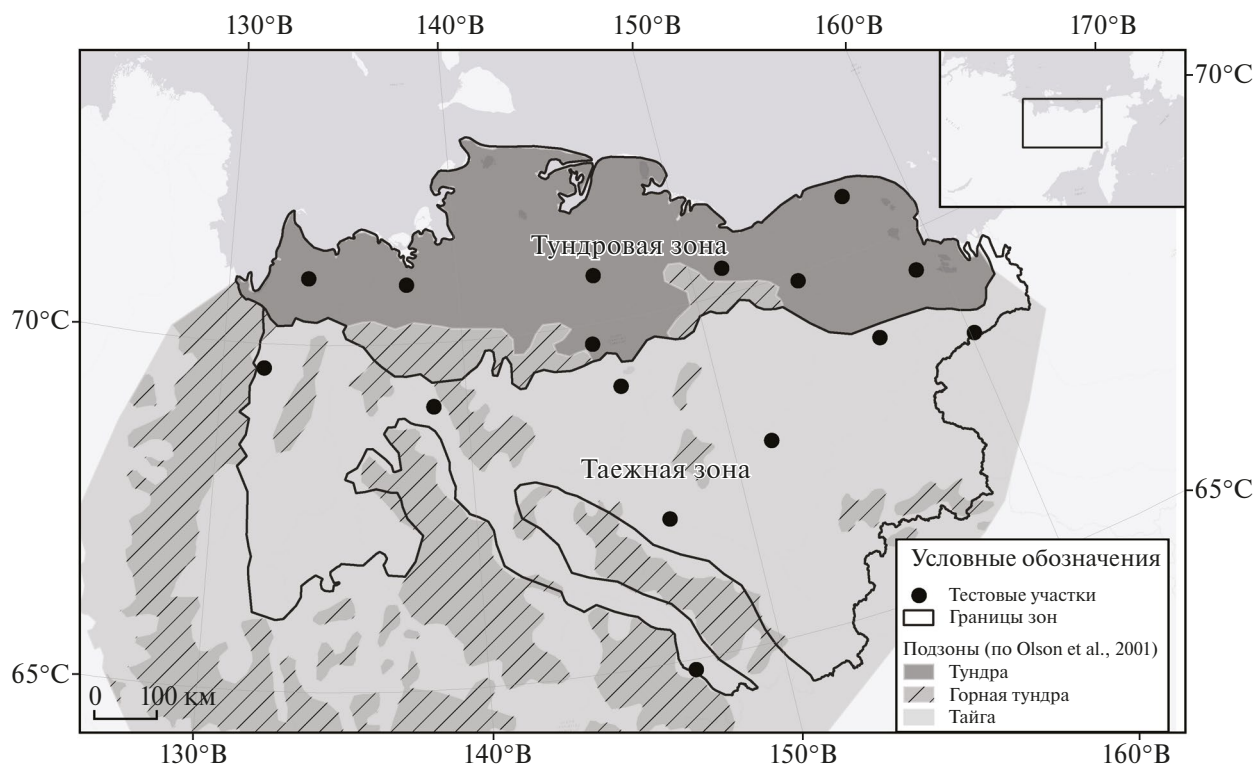


Рис. 1. Картограмма расположения исследуемой территории с обозначенными границами тундровой и таежной зон и местоположением тестовых участков.

Таблица 1. Площади исследуемых территорий

Зона	Подзона	Площадь, км ²	Относительная площадь, %
Тундровая	Прибрежная тундра	223 577	87
	Горная тундра	33 472	13
Таежная	Тайга	375 113	90
	Горная тундра	41 800	10

Сибири. Более того, как видно из рис. 1, выбранные тестовые участки располагаются вне территорий указанных включенных участков горной тундры в обеих исследуемых зонах.

Экспериментальное изучение распределения площадей термокарстовых озер проведено с использованием космических снимков высокого разрешения Канокус-В (разрешение 2.1 м) и снимков Sentinel-2 среднего разрешения (20 м), полученных в летние месяцы 2017–2021 гг. На рис. 2 представлены для иллюстрации фрагменты снимков территории исследования в тундровой (а, б) и таежной (в, г) зонах. Для ослабления влияния сезонных колебаний уровня воды в озерах все снимки относятся к довольно короткому периоду летнего сезона (июль–август), когда на озерах нет ледового покрова, затрудняющего дешифрирование озер на снимках средствами геоинформационной системы QGIS 3.2.

По мозаике снимков Sentinel-2 за период 2017–2022 гг. определялись число и площади озер с размерами в интервале от 2×10^3 до 10^8 м². Величина 2×10^3 м², являющаяся минимальной площадью озер, определяемых по снимкам Sentinel-2, принимается равной площади 5 пикселей (при разрешающей способности 20 м для снимков Sentinel-2), позволяющей достаточно надежно выделять контуры озер на фоне “шумов” космических изображений.

Ввиду ограниченности набора доступных нам безоблачных снимков Канокус-В, не обеспечивающего полное покрытие исследуемой территории этими снимками, число и площади озер были определены в интервале их размеров от 50 до 10^6 м² на 16 тестовых участках. Выбранные тестовые участки имели приблизительно одинаковые размеры около 3×10^7 м². Тестовые участки выбирались нами, как принято в подобных исследованиях, в местах скопления термокарстовых озер, то есть в зонах,

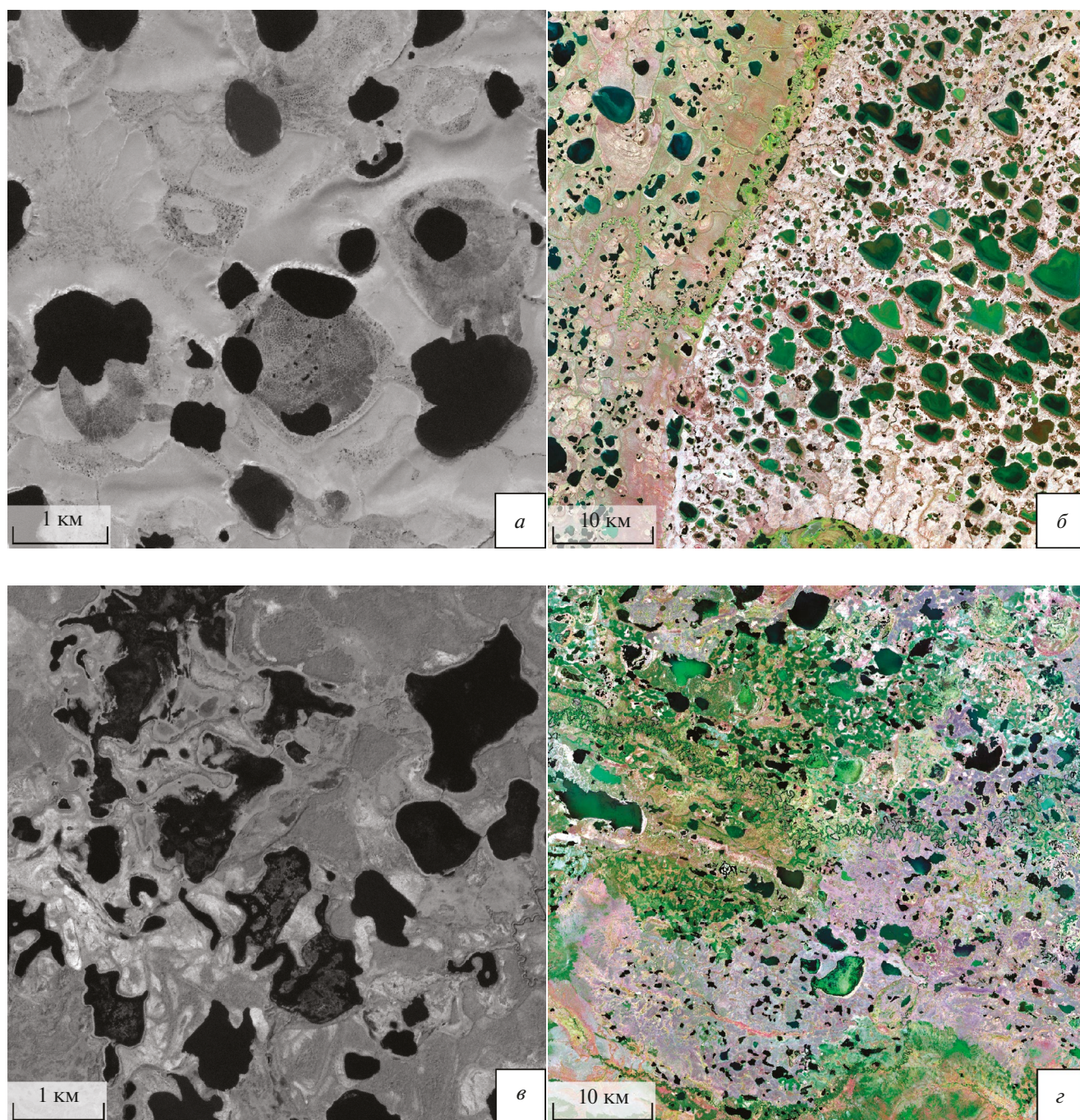


Рис. 2. Фрагменты космических снимков Канопус-В (слева, 30 августа 2018, 15 августа 2015) и Sentinel-2 (справа, 18, 20 августа 2022) тундровой (а, б) и таежной (в, г) зон исследуемой территории.

где существуют условия для формирования очагов термокарстовых процессов (Викторов и др., 2017).

При выборе местоположения тестовых участков (ТУ) необходимо было следовать принципу пропорциональности распределения числа ТУ (по ландшафтам тундровой и таежной зон) долям площади, занимаемым соответствующими ландшафтами на территории этих зон. Этот принцип

означает, что относительные величины числа ТУ в ландшафтах разных исследуемых зон должны соответствовать относительным величинам площади, занимаемой ландшафтами на территории этих зон. Ввиду относительно небольшого числа выбранных ТУ проверка соответствия этому принципу в настоящей работе проводилась по преобладающим ландшафтам тундровой и таежной зон. По

данным ландшафтной карты (Гудилин, 1987), преобладающими по площади ландшафтами тундровой зоны являются Субарктическая тундра (54.5%) и Лесотундра (19.1%), составляющие вместе 3/4 площади тундровой зоны. А в таежной зоне преобладающими ландшафтами являются Тайга (51.8%) и Горное редколесье (29.1%), общая площадь которых составляет 80.9% от площади зоны.

Соотношение числа ТУ, размещенных в преобладающих ландшафтах тундровой зоны (в Субарктической тундре и в Лесотундре) составляет $6/2 = 3$, что приблизительно соответствует (с относительной разницей 5%) соотношению площадей этих ландшафтных подзон, равному 2.85. Аналогичные оценки пропорции распределения числа ТУ по преобладающим ландшафтам (Тайга и Горное редколесье) получены и для таежной зоны, в которой доля площади указанных выше ландшафтных подзон, равная 1.8, также приблизительно соответствует соотношению числа размещенных в них ТУ ($5/2$). Следовательно, представленные выше оценки подтверждают, что пропорции распределения тестовых участков по преобладающим ландшафтам зон тундры и тайги примерно соответствуют долям, занимаемым преобладающими ландшафтами в тундровой и таежной зонах исследуемой территории.

Для изучения закономерностей распределения озер по размерам в исследуемых тундровой и таежной зонах используются гистограммы двух типов: распределения числа озер и распределения суммарных площадей озер по их размерам. Методика построения таких гистограмм, использованная в настоящей работе, основана на идее интеграции данных со снимков различного разрешения (Полищук и др., 2018), которая применительно к объединению данных Sentinel-2 и Канопус-В была реализована в (Муратов и др., 2023).

Указанная методика построения гистограмм предполагает раздельное формирование двух исходных гистограмм распределения озер, создаваемых отдельно по снимкам Sentinel-2 и Канопус-В с последующим их “сшиванием” в единую (синтезированную) гистограмму на основе сопоставления данных исходных гистограмм в области их перекрытия. Первая исходная гистограмма, формируемая по мозаике снимков Sentinel-2, определяет распределение озер в диапазоне размеров от 2×10^3 до 10^8 м². Вторая исходная гистограмма, являющаяся результатом экстраполирования данных, полученных по снимкам Канопус-В на отдельных тестовых участках, на всю исследуемую территорию, определяется в диапазоне размеров озер от 50 до 10^6 м². Диапазон перекрытия интервалов гистограмм, согласно приведенным выше данным, составляет в нашем случае $2 \times 10^3 - 10^6$ м².

Процедура экстраполирования данных об озерах, полученных по снимкам Канопус-В, на всю исследуемую территорию, изложенная в (Муратов и др., 2023), выполняется в предположении о том, что соотношения между числом малых озер и числом озер с размерами, определяющимися в диапазоне перекрывающихся интервалов двух исходных гистограмм, одинаковы как в пределах тестовых участков, так и на всей территории исследования. Оценка погрешностей экстраполяции данных со снимков высокого разрешения при построении гистограмм распределения озер показала на примере территории в зоне мерзлоты Западной Сибири (Полищук, 2018) практическую приемлемость указанного выше предположения.

Полученная таким образом для каждой из исследованных зон финальная (синтезированная) гистограмма распределения озер на основе “сшивания” двух исходных гистограмм в точке, соответствующей значению площади 2×10^3 , представляет распределение озер во всем диапазоне изменения площадей озер от 50 до 10^8 м², при этом в интервалах площадей гистограмм менее 2×10^3 используются экстраполированные данные со снимков Канопус-В, а в интервалах более 2×10^3 — измеренные данные со снимков Sentinel-2. Заметим, что в результате создаются для таежной и тундровой зон по две синтезированных гистограммы, а именно: гистограмма распределения числа озер и гистограмма распределения общей (суммарной в каждом частичном интервале) площади озер по их размерам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая характеристика полученных данных о размерах и количестве озер на территориях исследованных зон дана в табл. 2. Плотность озер на территории исследования была определена как отношение числа озер к площади территории. Согласно данным табл. 2, плотность озер в тундровой зоне в 2.5 раза выше, чем в тайге. Степень заозеренности определялась как отношение суммарной площади озер на определенной территории к площади этой территории. Как видно из табл. 2, степень заозеренности территории тундры значительно (почти в 2 раза) превышает этот показатель для тайги.

Полученные в работе гистограммы распределения озер таежной и тундровой арктических зон северо-востока в широком диапазоне их размеров ($50 - 10^8$ м²) графики распределения общего числа и суммарных площадей озер в интервалах размеров площадей представлены на рис. 3 и 5 соответственно. Как видно из рис. 3, графики демонстрируют сходный в общем характер поведения, проявляющийся на территории обеих зон в росте числа озер при уменьшении их размеров. Тем не менее гисто-

Таблица 2. Общая характеристика проведенных исследований озер в таежной и тундровой арктических зонах и полученные результаты

Показатель	Тундра	Тайга
Площадь зоны, км ²	257 049	416 913
Число ТУ на снимках Канокус-В	8	8
Количество озер	703 897	459 454
Суммарная площадь озер, км ²	29 928	25 493
Плотность озер, число озер / км ²	2.738	1.102
Степень заозеренности	0.116	0.061

граммы на рис. 3 проявляют в разных зонах и индивидуальные особенности. Для более подробного рассмотрения особенностей графиков гистограмм распределения числа озер в таежной и тундровой зонах выделим на оси абсцисс (рис. 3) три диапазона размеров озер:

- менее 500 м² (0.05 га) – малые озера;
- от 500 до 200 000 м² – средние по размерам озера;
- более 200 000 м² (20 га) – большие озера.

В диапазоне больших озер, обозначенном цифрой 3 на рис. 3, графики гистограмм по общему

виду практически идентичны, что демонстрирует одинаковую для обеих зон динамику сокращения числа озер с ростом их размеров. Несмотря на значительное превышение плотности озер и степени заозеренности территории тундры (в 2.5 и 1.9 раза соответственно) по сравнению с таежной зоной, в этом диапазоне можно отметить независимость характера распределения озер от принадлежности их к разным зонам.

В диапазоне малых озер, по данным рис. 3, проявляется заметный (хотя и значительно меньший, чем в диапазоне 3) наклон графика к оси площадей, отображающий тенденцию роста числа озер по мере уменьшения их площадей. В этом диапазоне графики для обеих зон при практически одинаковом общем их виде имеют различия по числу озер. Так, в тундре число озер почти в 2 раза превышает их число в таежной зоне. Этот вывод подтверждается и данными табл. 2, согласно которой при сравнимых по величине общих площадях озер численность озер в тундре более чем в 1.5 раза превышает эту величину в тайге.

В диапазоне промежуточных значений размеров озер, обозначенном цифрой “2” на рис. 3, отмеченное в диапазоне 1 различие в численности озер в разных зонах сохраняется. Однако в диапазоне 2 существенно ослабляется зависимость числа

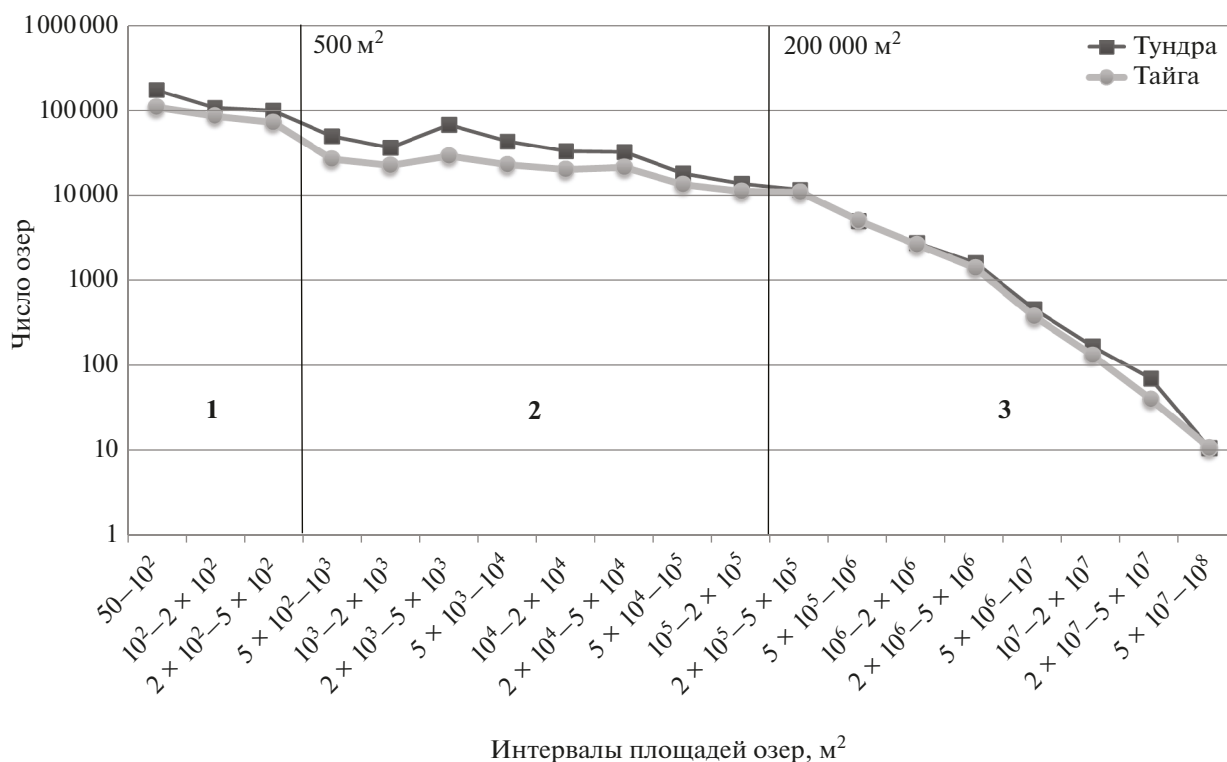


Рис. 3. График распределения числа термокарстовых озер по интервалам их размеров на территориях исследованных тундровой и таежной зон на основе снимков Канокус-В и Sentinel-2. Полуширинными цифрами 1, 2 и 3 обозначены диапазоны размеров озер.

озер от их размеров по сравнению с соседними диапазонами размеров озер 1 и 3. На территории тундры в этом диапазоне, как и в диапазоне 1, число озер больше, чем в таежной зоне, что можно рассматривать как проявление большего вклада озер меньших размеров в их общую численность. Однако заметим, что эти различия в числе озер в обеих зонах постепенно исчезают по мере приближения размеров озер на графике рис. 3 к границе 2-го и 3-го диапазонов.

Проведено сравнение на количественном уровне распределений эмпирических гистограмм распределения числа озер (рис. 3) в разных зонах путем сопоставления уравнений аппроксимации зависимости логарифмов числа озер от логарифмов их площадей полиномиальным уравнением 2-й степени. Результаты аппроксимации приведены на рис. 4, представленном в преобразованных координатах, полученных переходом к десятичным логарифмам чисел на осях системы координат графика рис. 3. В поле графика на рис. 4 приведены уравнения полиномиальной аппроксимации, полученные с очень высоким уровнем коэффициента детерминации R^2 (более 0.95). Расчет относительных отклонений значений коэффициентов при линейных и квадратичных членах уравнений аппроксимации для тундровой и таежной зон показал их пренебрежимо малые значения (менее 2 и 1 % соответственно), что может служить основанием для вывода о несущественности различий в эмпирических законах распределения озер в тундре и в тайге на северо-востоке Сибирской

Арктики. Следовательно, несмотря на значительные различия в эколого-ландшафтных условиях арктических зон тундры и тайги, не наблюдается их заметного влияния на статистические закономерности распределения полей озер в двух разных природных зонах.

График на рис. 5 представляет эмпирические гистограммы распределения суммарных площадей озер по интервалам их размеров в арктических зонах тундры и тайги. Проведем анализ этих гистограмм с целью выявления особенностей распределения суммарных площадей озер по их размерам в двух разных зонах северо-востока Сибирской Арктики. Заметим, что по общему виду графиков на рис. 5 эмпирические гистограммы распределения площадей озер по их размерам для тундры и тайги практически идентичны. С целью оценки степени сходства этих гистограмм в разных зонах проведено их количественное сравнение путем сопоставления уравнений полиномиальной аппроксимации зависимостей логарифмов суммарной площади озер от логарифма размеров аналогично тому, как это было сделано выше в случае с распределением числа озер (рис. 3 и 4).

На рис. 6 приведены графики зависимостей логарифмов суммарной площади озер от логарифма их размеров для тундровой и таежной зон, построенных по аналогии с графиками на рис. 4. В поле графика рис. 6 приведены уравнения полиномиальной аппроксимации указанных зависимостей, которые получены с достаточно высоким уровнем коэффициента детерминации R^2 . Оценка отно-

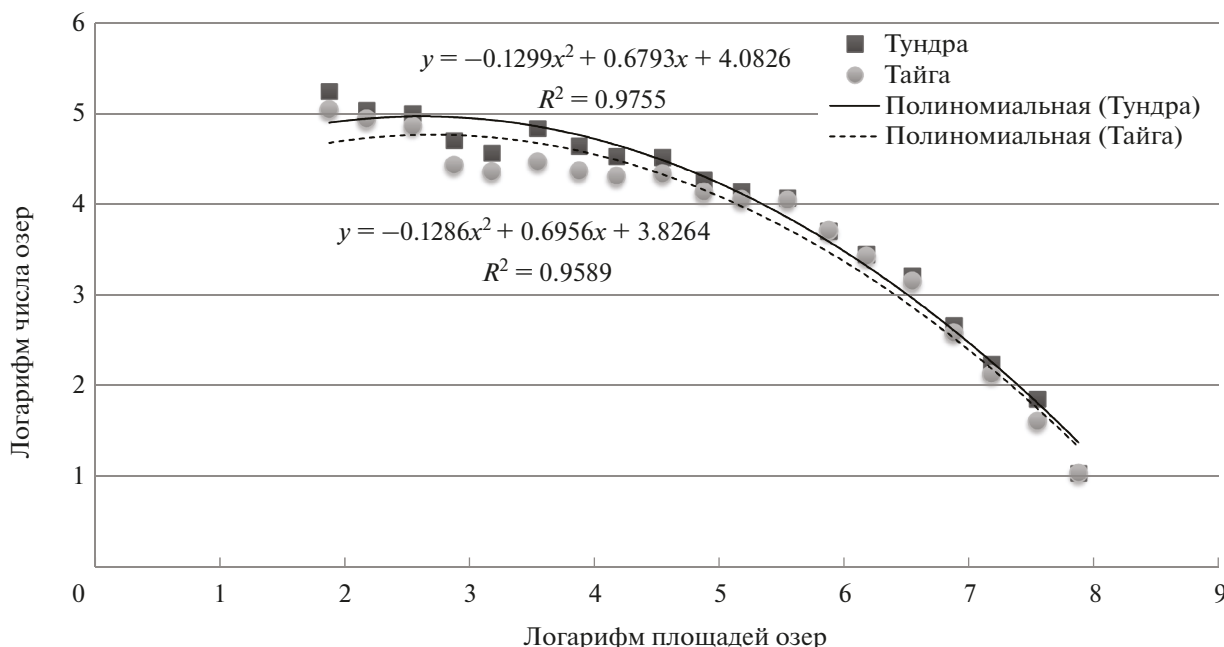


Рис. 4. Зависимость логарифма числа термокарстовых озер от логарифма их размеров.

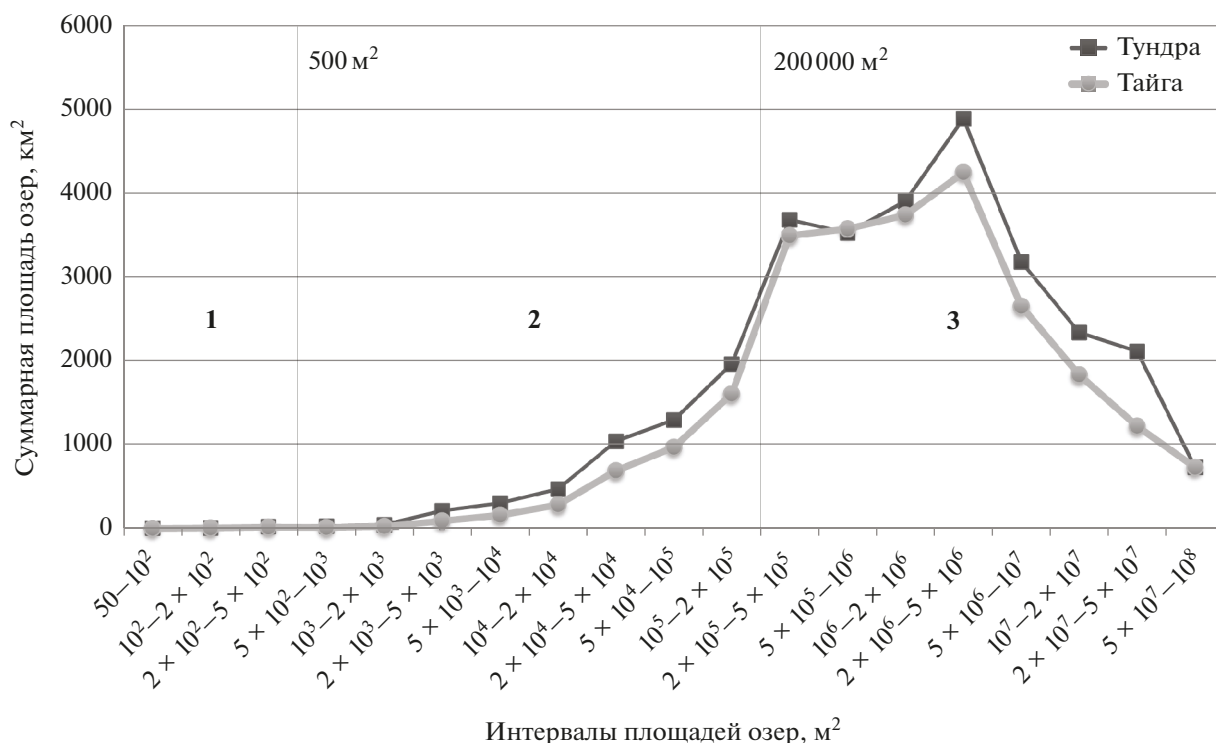


Рис. 5. График распределения суммарных площадей термокарстовых озер по интервалам их размеров на исследованных территориях на основе снимков Канокус-В и Sentinel-2. Полу жирными цифрами 1, 2 и 3 обозначены диапазоны размеров озер.

сительных отклонений значений коэффициентов при линейных и квадратичных членах уравнений аппроксимации для тундровой и таежной зон показала их пренебрежимо малые значения (менее 1 и 0.5 % соответственно), что является показателем несущественности различий в эмпирических законах распределения суммарных площадей озер в тундре и в тайге исследуемой территории. Несмотря на существенность различий природных условий арктических зон тундры и тайги, их влияние на статистические закономерности распределения суммарной площади озер в двух разных природных зонах не обнаруживается.

Как видно из рис. 5, эмпирические гистограммы распределения площадей озер в зонах тундры и тайги северо-востока Сибири проявляют отдельные особенности в зависимости от их размеров. Для выявления этих особенностей в табл. 3 представлены данные об относительной величине суммарной площади озер тундровой и таежной зон в разных диапазонах размеров озер.

Согласно данным для диапазона 1 (рис. 5), вклад малых озер в общую площадь арктических озер как таежной, так и тундровой зон пренебрежимо мал и, по данным табл. 3, не превышает 0.17 и 0.20 % соответственно. Основной вклад в общую площадь озер дают большие озера, доля площади которых,

по данным табл. 3 для диапазона 3, превышает 80% от общей площади озер (в тундре около 82%, в таежной зоне почти 85%).

Анализ данных рис. 5 позволяет сделать следующий важный вывод. Вклад озер с размерами менее $2 \times 10^3 \text{ м}^2$, данные о которых получены по снимкам Канокус-В, составляет 0.49 и 0.36 % общей площади озер тундровой и таежной зон соответственно. Следовательно, озера с размерами $2 \times 10^3 \text{ м}^2$ и более, площади которых измеряются по снимкам Sentinel-2, в совокупности дают суммарную площадь более 99.5% от общей площади озер на территориях как тундры, так и тайги, то данными о площадях озер, измеряемых по снимкам Канокус-В, можно пренебрегать. Поэтому в работах, связанных с использованием данных дистанционных исследований для оценки объемов накопления метана и углекислого газа в арктических озерах северо-востока Сибири, достаточно обходиться снимками Sentinel-2, не прибегая к использованию снимков высокого/сверхвысокого разрешения. Учитывая схожий характер графиков гистограмм распределения суммарной площади озер по их размерам на других арктических территориях, например, на Чукотке (Полищук, Муратов, 2023) или в Западной Сибири (Полищук и др., 2015), можно предполагать, что этот вывод будет справедлив для дистанционных иссле-

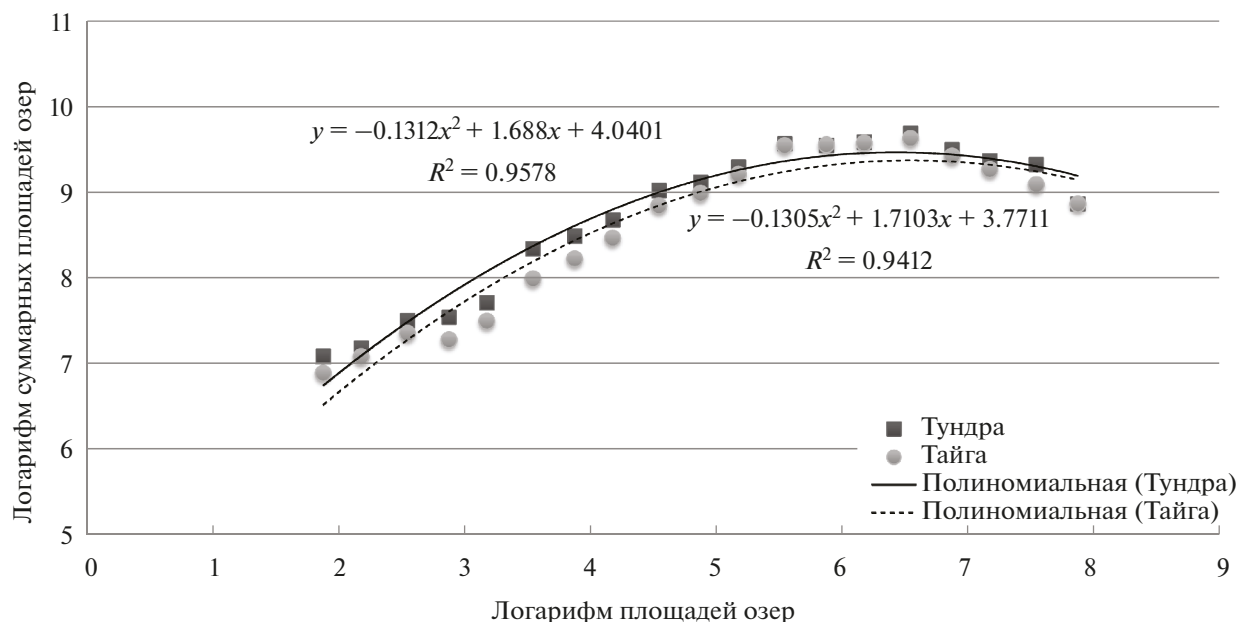


Рис. 6. Зависимость логарифма суммарной площади термокарстовых озер от логарифма их размеров.

Таблица 3. Относительная суммарная площадь озер (%) в разных диапазонах их размеров

Номер диапазона размеров озер	1	2	3
Тундровая зона	0.20	18.12	81.68
Таежная зона	0.17	15.27	84.56

дований озер с использованием снимков Sentinel-2 и на других арктических территориях.

В порядке обсуждения полученных результатов заметим: несмотря на то, что заозеренность и плотность озер на территории Северо-восточной тундры, по данным табл. 2, в 1.9 и в 2.5 раза соответственно больше, чем в зоне тайги, гистограммы распределения числа и площадей озер в тундре и в тайге по общему виду графиков (рис. 3 и 5) отличаются незначительно. Это позволяет сделать вывод о статистической однородности пространственной структуры поля термокарстовых озер на исследованной территории тундры и тайги северо-востока Сибирской Арктики. Подтверждением вывода о статистической однородности структуры поля озер являются и результаты сравнения эмпирических гистограмм распределения числа и площадей озер по размерам в двух разных природных зонах (рис. 3 и 5), изложенных выше при анализе графиков на рис. 4 и 6.

Представляет интерес провести сравнение Северо-восточной тундры с соседней территорией Чукотской тундры по этим важным показателям. Расчеты показывают, что показатели заозеренности и плотности озер в Чукотской тундре, состав-

ляющие, согласно (Полищук и Муратов, 2023), величины 0.29 км² и 0.014, почти на порядок (в 8.3 и 9.4 раз соответственно) меньше, чем для территории Северо-восточной тундры. Следовательно, можно принять, что влияние различий природных свойств территорий тундры и тайги северо-востока Сибирской Арктики на характеристики полей термокарстовых озер значительно менее выражено по сравнению с влиянием этих различий для тундровых зон Северо-восточной Сибири и Чукотки.

Полученные в работе результаты исследования термокарстовых озер позволяют сформулировать некоторые оценочные суждения о закономерностях эмиссии ПГ в атмосферу из озер северо-востока Сибирской Арктики. Вследствие экспериментально обнаруженного в (Pokrovsky et al., 2011) превышения почти на порядок концентрации метана и углекислого газа в термокарстовых озерах малых размеров (менее 500 м²) по сравнению с большими озерами во многих работах, связанных с оценкой озерной эмиссии ПГ, например, (Holgerson, Raymond, 2016), прогнозировался большой вклад малых озер в общую эмиссию ПГ. Отметим, что ввиду небольшой глубины (до 0.5–1 м) термокарстовых озер различных размеров уровень эмиссии из озер, согласно (Полищук и др., 2015), пропорционален их суммарной площади. Поэтому, несмотря на очень большую численность малых арктических озер (до 10⁵–2 × 10⁵, по данным рис. 3), из-за крайне незначительной суммарной площади малых озер (менее 0.3%, по данным табл. 3) их вклад в общий объем озерного метана как в тундровой, так и в таежной зонах будет пренебрежимо малым. Этот вывод со-

гласуется и с заключением (Polishchuk et al., 2018) о незначительном вкладе малых озер в общую эмиссию ПГ в зоне мерзлоты Западной Сибири, которое было основано на результатах дистанционных исследований по спутниковым снимкам Landsat-8 и Канопус-В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложены результаты сравнительного анализа распределения по размерам термокарстовых озер в тундровой и таежной зонах северо-востока Сибирской Арктики, полученных по спутниковым снимкам Sentinel-2 и Канопус-В с различным пространственным разрешением 20 и 2.1 м соответственно, полученных в летние месяцы 2017–2021 гг. Дешифрирование озер на снимках проведено с использованием средств геоинформационной системы QGIS 3.2. Полученные данные позволили рассчитать плотность озер и степень заозеренности каждой из исследованных территорий. Показано, что на территории тундры по сравнению с зоной тайги заозеренность и плотность озер больше в 1.9 и в 2.5 раз соответственно.

С использованием полученных данных о числе и площадях озер определены гистограммы распределения озер в очень широком диапазоне их размеров от 50 до 10^8 м² для арктических тундровой и таежной зон. Сравнение графиков гистограмм распределения числа озер по размерам в разных арктических зонах показало, что для больших озер (с размерами более 200 000 м²) графики практически идентичны для обеих территорий исследования, а численность озер с размерами менее 200 000 м² в тундре значительно превышает их величину в таежной зоне. Исследованы особенности распределения суммарных площадей озер в интервалах их размеров. Показано, что вклад малых озер с размерами менее 500 м² в общую площадь арктических озер как в тундровой, так и в таежной зонах северо-востока Сибири пренебрежимо мал и не превышает 0.20 и 0.17%, соответственно. Основной вклад в общую площадь озер дают большие озера (более 200 000 м²), вклад которых превышает 80% от общей площади озер (в тундре 82%, в таежной зоне 85%).

Учитывая, что вклад озер с размерами менее 2×10^3 м², данные о которых для построения гистограмм распределения площадей озер получены по снимкам Канопус-В, составляет всего лишь 0.49 и 0.36% общей площади озер тундровой и таежной зон соответственно, этими данными о площадях озер, измеряемых по снимкам Канопус-В, можно пренебрегать. Поэтому в работах, связанных с использованием данных дистанционных

исследований для оценки объемов накопления метана и углекислого газа в арктических озерах северо-востока Сибири, достаточно обходиться снимками Sentinel-2, не прибегая к необходимости использования снимков высокого/сверхвысокого разрешений.

Несмотря на то, что заозеренность территории тундровой зоны больше, чем таежной, графики гистограмм распределения озер в этих зонах по общему виду отличается незначительно, что позволяет сделать вывод об относительной однородности статистической структуры полей термокарстовых озер в таежной и тундровой зонах на северо-востоке Сибири. Этот вывод подтверждается и результатами количественного сравнения гистограмм распределения озер на исследуемой территории, основанными на использовании уравнений полиномиальной аппроксимации.

Учитывая, что объем накопления ПГ в термокарстовых озерах исследуемой территории, согласно (Полищук и др., 2015), пропорционален суммарной площади озер на этой территории, на основе данных табл. 2 можно предполагать лишь незначительное превышение (до 15 %) объемов накопления метана и углекислого газа в тундровых озерах по сравнению с озерами таежной зоны, несмотря на полуторное превышение площади тайги по сравнению с тундровой зоной.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Викторов А.С., Капранова 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 озер // Доклады Академии наук. 2017. Т. 474. № 5. С. 625–627. DOI: 10.7868/S0869565217170212.
- Гаврилов А.В., Замолотчикова С.А. Современные природные условия развития сезонно- и многолетнемерзлых пород. Климат // Геоэкология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. М.: Недра, 1989. С. 31–48.
- Гудилин И.С. Ландшафтная карта СССР (1:2500000). М.: Гидрогеология, 1987. 16 л.
- Кравцова В.И., Родионова Т.В. Исследование динамики площади и количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам // Криосфера Земли. 2016. № 1. С. 81–89.
- Муратов И.Н., Байсаямова О.А., Полищук Ю.М. Изучение распределения по размерам термокарстовых озер восточной части Российской Арктики на основе совмещения данных со снимков Sentinel-2 и Канопус-В // Исследование Земли из космоса. 2023. № 4. С. 52–59. DOI 10.31857/S0205961423040061.

- Полищук Ю.М., Богданов А.Н., Брыксина Н.А., Муратов И.Н., Полищук В.Ю. Интеграция космических снимков сверхвысокого и среднего разрешения для построения гистограмм распределения площадей термокарстовых озер в расширенном диапазоне их размеров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 9–17. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-9-17.
- Полищук Ю.М., Муратов И.Н. Термокарстовые озера Чукотской тундры по снимкам Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 4. С. 205–213. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-205-213
- Полищук Ю.М., Полищук В.Ю., Брыксина Н.А., Покровский О.С., Кирпотин С.Н., Широкова Л.С. Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озерах криолитозоны Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 2. С. 12–135.
- Федоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А. и др. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). М-б 1: 1 500 000 / гл. ред. М.Н. Железняк. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. 2 л.
- Holgerson M.A., Raymond P.A. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds // Nature Geoscience Letters. 2016. V. 9. P. 222–226. DOI: 10.1038/ngeo2654.
- Messager M. L., Lehner B., Grill G., Nedeva I., Schmitt O. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach // Nature Communications. 2016. V. 7. Article 13603. DOI: 10.1038/ncomms13603.
- Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V., Underwood E.C., D'amico J.A., Itoua I., Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Ricketts T.H., Kura Y., Lamoreux J.F., Wettengel W.W., Hedao P., Kassem K.R. 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 // BioScience. 2001. V. 51. Issue 11. P. 933–938. DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2
- Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., Dupre B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 565–583. DOI: 10.5194/bg-8-565-2011.
- Polishchuk Y.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Polishchuk V.Y., Lim A., Manasyapov R.M., Shirokova L.S. and 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. DOI: 10.1088/1748-9326/aab046.
- Serikova S., Pokrovsky O.S., Laudon H., Krickov I.V., Lim A.G., Manasyapov R.M., Karlsson J. High carbon emissions from thermokarst lakes of Western Siberia // Nature Communications. 2019. V. 10. Article 1552. DOI: 10.1038/s41467-019-09592-1.
- 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, northeastern Siberia // Remote Sensing. 2021. V. 13. 178. DOI: 10.3390/rs13020178.
- 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.
- Zabelina S., Shirokova L., Klimov S., Chupakov A., Lim A., Polishchuk Y., Polishchuk V., Bogdanov A., Muratov I., Guerin F., Karlsson J., and Pokrovsky O. Carbon Emission from Thermokarst Lakes in NE European Tundra // Limnology and Oceanography. 2021. V. 66. P. S216–S230. DOI: 10.1002/lno.11560.

Thermokarst Lakes of Taiga and Tundra Zones of the Siberian Arctic Based on Kanopus-V and Sentinel-2 Images

I. N. Muratov¹, Yu. M. Polishchuk¹

¹Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia

The patterns of size distribution of thermokarst lakes in the tundra and taiga Arctic zones of northeastern Siberia were studied based on space images from the Kanopus-V and Sentinel-2 satellites (with spatial resolution of 2.1 and 20 m, respectively) acquired in the summer months of 2017–2021. Lakes were interpreted on a mosaic of Sentinel-2 satellite images and on 16 test plots on Kanopus-V images in order to determine the number of lakes and their areas within each of the specified zones. Experimental histograms of distribution of the number and total areas of lakes by their sizes were obtained for the studied tundra and taiga zones in an extremely wide range of lake sizes from 50 to 10⁸ m² based on the integration of data from images of different spatial resolution. The histograms of the distribution of the number of lakes by their sizes demonstrate a similar behavior in both zones, manifested in the growth of the number of lakes as their sizes decrease. It is shown that the main contribution to the total area of lakes is made by large lakes (more than 200,000 m²), the share of which exceeds 80% of the total area of lakes (in the tundra 82%, in the taiga zone 85%). The contribution of small lakes (less than 500 m²) to the total area of Arctic lakes in both tundra and taiga zones is negligible and does not exceed 0.20–0.17%, respectively. The characteristics of lake density and the degree of lake coverage of the studied territories were studied. It is shown that the lake coverage and density in the tundra is 2 and 2.5 times higher than in the taiga zone.

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

REFERENCES

- Viktorov A.S., Kapralova V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Arkhipova M.V., Berezhin P.V., Zverev A.V., Panchenko E.N., Sadkov S.A. Zakonomernosti raspredeleniya razmerov termokarstovykh ozer [Consistent patterns of the size distribution of thermokarst lakes] //Doklady Earth Sciences. 2017. V. 474. № 2. P. 692694. DOI: 10.1134/S1028334X17060162.
- Gavrilov A.V., Zamolotchkova S.A. Sovremennye prirodnye usloviya razvitiya sezonno- i mnogoletnemerzlykh porod. Klimat [Current natural conditions of development of seasonally and permafrost rocks. Climate] // Geokriologiya SSSR. Vostochnaya Sibir' i Dal'nii Vostok. Moscow: Nedra, 1989. P. 31–48 (In Russian).
- Gudilin I.S. Landshaftnaya karta SSSR (1:2500000) (Landscape map of the USSR), Moscow: Gidropetsgeologiya, 1987. 16 p. (In Russian).
- Kravtsova V.I., Rodionova T.V. Issledovanie dinamiki ploshchadi i kolichestva termokarstovykh ozer v razlichnykh raionakh kriolitozony Rossii po kosmicheskim snimkam [Investigation of the dynamics in area and number of thermokarst lakes in various regions of Russian cryolithozone, using satellite images] // Kriosfera Zemli. 2016. № 1. P. 81–89. (In Russian).
- Muratov I.N., Baysalyamova O.A., Polishchuk Y.M. Study of Thermokarst Lake Size Distribution in the Eastern Part of the Russian Arctic Based on Combining Sentinel-2 and Kanopus-V Images // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2023. V. 59. № 10. P. 1459–1464. DOI: 10.1134/S0001433823120150.
- Polishchuk Y.M., Bogdanov A.N., Bryksina N.A., Muratov I.N., Polishchuk V.Y. Integratsiya kosmicheskikh snimkov sverkh-vysokogo i srednego razresheniya dlya postroeniya gistogramm raspredeleniya ploshchadei termokarstovykh ozer v rasshirennom diapazone ikh razmerov [Integration of high and medium resolution space images for histograms of the thermokarst lake area distribution in the extended range of their sizes] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa. 2018. V. 16. № 3. P. 9–17. (In Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-9-17.
- Polishchuk Y.M., Muratov I.N. Termokarstovye ozero Chukotskoi tundry po snimkam Sentinel-2 [Thermokarst lakes of the Chukchi tundra as observed in Sentinel-2 images] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa. 2023. V. 20. № 4. P. 205–213. (In Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-205-213.
- Polishchuk Y.M., Polishchuk V.Y., Bryksina N.A., Pokrovskii O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S. Metodicheskie voprosy otsenki zapasov metana v malykh termokarstovykh ozerakh kriolitozony Zapadnoi Sibiri [Methodological issues of evaluating methane capacity in small thermokarst lakes of Western Siberia permafrost] //Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2015. V. 326. № 2. P. 12–135. (In Russian).
- Fedorov A.N., Torgovkin Y.I., Shestakova A.A. et al. Merzlotno-landshaftnaya karta Respubliki Sakha (Yakutiya). Masshtab 1: 1 500 000 [Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) 1: 1 500 000] / Edited by M.N. Zheleznyak. Yakutsk: IMZ SO RAN, 2018, 2 p. (In Russian).
- Holgerson M.A., Raymond P.A. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds //Nature Geoscience Letters. 2016. V. 9. P. 222–226. DOI: 10.1038/ngeo2654.
- Messenger M. L., Lehner B., Grill G., Nedeva I., Schmitt O. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach //Nature Communications. 2016. V. 7. Article 13603. DOI: 10.1038/ncomms13603.
- Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V., Underwood E.C., D'amico J.A., Itoua I., Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Ricketts T.H., Kura Y., Lamoreux J.F., Wettengel W.W., Hedao P., Kassem K.R. 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 //BioScience. 2001. V. 51. Issue 11. P. 933–938. DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOT-WA]2.0.CO;2.
- Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., Dupre B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 565–583. DOI: 10.5194/bg-8-565-2011.
- Polishchuk Y.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Polishchuk V.Y., Lim A., Manasyrov R.M., Shirokova L.S. and 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. DOI: 10.1088/1748-9326/aab046.
- Serikova S., Pokrovsky O.S., Laudon H., Krickov I.V., Lim A.G., Manasyrov R.M., Karlsson J. High carbon emissions from thermokarst lakes of Western Siberia //Nature Communications. 2019. V. 10. Article 1552. DOI: 10.1038/s41467-019-09592-1.
- 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. DOI: 10.3390/rs13020178.
- 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.
- Zabelina S., Shirokova L., Klimov S., Chupakov A., Lim A., Polishchuk Y., Polishchuk V., Bogdanov A., Muratov I., Guerin F., Karlsson J., and Pokrovsky O. Carbon Emission from Thermokarst Lakes in NE European Tundra //Limnology and Oceanography. 2021. V. 66. P. S216–S230. DOI: 10.1002/lno.11560.