

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАЗМЕРАМ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ НА ОСНОВЕ СОВМЕЩЕНИЯ ДАННЫХ СО СНИМКОВ SENTINEL-2 И КАНОПУС-В

© 2023 г. И. Н. Муратов^а, О. А. Байсалямова^а, Ю. М. Полищук^а, *

^аЮгорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия

*E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Поступила в редакцию 17.10.2022 г.

Статья посвящена вопросам дистанционных исследований распределения термокарстовых озер по размерам на территории восточной части Российской Арктики. Исследования проведены на арктических территориях Северо-восточной (Якутия) и Чукотской тундр, представляющих сравнительно однородные по природным свойствам области, называемые здесь экорегионами. Дистанционные исследования распределения термокарстовых озер по площадям проведены с использованием 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 с использованием мозаики спутниковых снимков Sentinel-2, обеспечивающей полное покрытие исследуемых территорий, снимков Канопус-В на 12 тестовых участках и средств QGIS 3.22. Кратко изложена методика интеграции (комбинирования) данных со снимков Канопус-В и Sentinel-2 для построения графиков синтезированных гистограмм распределения озер по их размерам. Методика позволила получить гистограммы распределения озер в очень широком диапазоне их размеров от 50 до 10⁸ м² в исследованных арктических экорегионах. Графики гистограмм демонстрируют сходный характер поведения в обоих экорегионах, проявляющийся в росте числа озер по мере уменьшения их размеров. Показано, что основной вклад в численность озер Северо-восточной тундры дают значительно более крупные озера, чем в Чукотской тундре, что может свидетельствовать о значительном различии геоэкологических условий на разных арктических территориях восточной части Российской Арктики. Проведена оценка степени заозеренности территорий. Показано, что заозеренность Северо-восточной тундры в 7 раз выше, чем на исследованных территориях Чукотки.

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

DOI: 10.31857/S0205961423040061, EDN: XLJCHX

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современных климатических изменений значительный интерес представляют вопросы оценки объемов эмиссии парниковых газов с территорий Арктической зоны как мест сосредоточения термокарстовых озер, которые вследствие интенсивной биогеохимической активности являются интенсивными источниками эмиссии парниковых газов в атмосферу (Walter, Smith and Chapin, 2007; Pokrovsky et al., 2011; Hølgerson, Raymond, 2016; Serikova et al., 2019). Являясь накопителем законсервированного углерода в озерно-болотных комплексах Арктики, вследствие высвобождения парниковых газов при потеплении климата мерзлота может стать источником еще большего повышения температуры земной поверхности (Zimov et al., 1997).

Известно (Полищук и др., 2015), что объемы эмиссии в атмосферу озерного метана и углекислого газа на исследуемой территории определяются суммарной площадью озер на этой территории. Поэтому важной с точки зрения оценки объемов накопления озерного метана рассматривается задача исследования закономерностей распределения термокарстовых озер по их размерам на различных территориях. Ввиду труднодоступности и высокой степени заболоченности территории в зонах мерзлоты для получения таких данных в настоящее время используются спутниковые снимки.

В последние годы проведены дистанционные исследования распределения площадей термокарстовых озер в Сибири и в некоторых других северных регионах (Kirpotin, Polishchuk and Bryksina, 2009; Karlsson, Lyon and Destouni, 2014; Викторов и др., 2017). В большинстве этих исследований ис-

пользовались космические снимки среднего разрешения (30 м) Landsat, обеспечивающие многократное полное покрытие земного шара. Но эти снимки не позволяют обнаруживать озера малых размеров, концентрация метана в которых, согласно (Pokrovsky et al., 2011; Holgerson, Raymond, 2016), более чем на порядок превышает его концентрацию в озерах с размерами более 0.1–0.5 га.

В ряде работ, например, (Grosse et al., 2008), для исследования распределений термокарстовых озер в зоне мерзлоты использовались снимки высокого разрешения. Однако эти снимки из-за малой полосы охвата территории обеспечивают сравнительно небольшое покрытие исследуемой территории, что позволяет исследовать распределение озер лишь на ограниченных по размерам территориях в пределах тестовых (ключевых) участков. Поэтому возникла необходимость объединения (интеграции) данных о численности и площадях озер, получаемых на исследуемой территории по спутниковым снимкам различного (среднего, высокого и сверхвысокого) пространственного разрешения.

В (Полищук и др., 2018) разработана методика интеграции данных со спутников разного разрешения для построения гистограмм распределения озер в очень широком диапазоне размеров, включая и малые озера. С использованием этой методики получены оценки запасов метана и углекислого газа в термокарстовых озерах на территориях криолитозоны Западной Сибири (Polishchuk et al., 2018) и северо-востока Европейской части Российской Арктики (Zabelina et al., 2020). Однако получение обоснованных оценок запасов парниковых газов в термокарстовых озерах на обширной территории восточной части Российской Арктики, площадь территории которой в несколько раз превышает площадь арктической зоны Западной Сибири, невозможно из-за отсутствия в настоящее время знаний о распределении озер на указанной территории.

Проведенные в настоящее время 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 спутниковых снимков среднего разрешения. В (Grosse et al., 2008) представлены графики распределения числа озер по площадям, полученные по снимкам высокого разрешения лишь для нескольких тестовых участков, расположенных в Восточной Сибири вблизи береговой границы Ледовитого океана. В связи с этим результаты этих исследований не могут в полной мере отражать закономерности распределения озер на обширной континентальной территории многолетней мерзлоты в восточной части Российской Арктики, что требует проведения ис-

следований распределения озер на всей территории исследований с использованием комбинации снимков среднего и высокого разрешения.

В связи с этим целью данной работы является экспериментальное изучение распределения численности озер по размерам на восточных арктических территориях России – в Северо-восточной (Якутия) и Чукотской тундрах – по спутниковым снимкам разного разрешения Sentinel-2 и Канопус-В.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория площадью 557872 км² простирается примерно на 2500 км с запада на восток и 500 км с севера на юг. Согласно (Котляков и др., 2020), территория располагается в зоне арктического климатического пояса. Средняя температура в январе изменяется от –16°C (Чукотка) до –30°C (Северная Якутия). Средняя температура июля изменяется от 2 до 10°C. На территории исследования широко распространены многолетнемерзлые породы, достигающие на северо-востоке Якутии наибольшей (до 500 м) мощности при постоянной температуре –10°C и сравнительно тонком (от 30 до 100 см) слое сезонного протаивания. Территория подстилается непрерывной вечной мерзлотой, среднегодовая температура грунтов которой, по данным (Котляков и др., 2020), изменяется в пределах от –3 до –7°C. Годовая сумма осадков колеблется от 150 до 500 мм (Самойлова и др., 2019). В (Кравцова, Быстрова, 2009) на основе геоморфологического анализа криолитозона восточной части Российской Арктики отнесена к числу районов с повсеместным распространением термокарстовых озер. Такие озера характеризуются чрезвычайно широким диапазоном изменений их размеров – от единиц м² до десятков км².

Исследуемая территория, расположение которой показано на рис. 1, была разделена на два сравнительно однородных по ландшафтным и геокриологическим свойствам области, называемые далее в соответствии с (Olson et al., 2001) арктическими экорегионами: северо-восточная тундра (СВТ) и чукотская тундра (ЧТ). На рис. 1 в соответствии с (Olson et al., 2001) показаны границы исследованных экорегионов.

Экспериментальное изучение распределения площадей термокарстовых озер проведено с использованием космических снимков высокого разрешения Канопус-В (разрешение 2.1 м) и снимков Sentinel-2 среднего разрешения (20 м), полученных в летние месяцы 2017–2021 гг. Все снимки были отобраны в довольно короткий период летнего сезона (конец июня–август), чтобы минимизировать влияние сезонных колебаний уровня воды в озерах. В этот период озера практически сво-

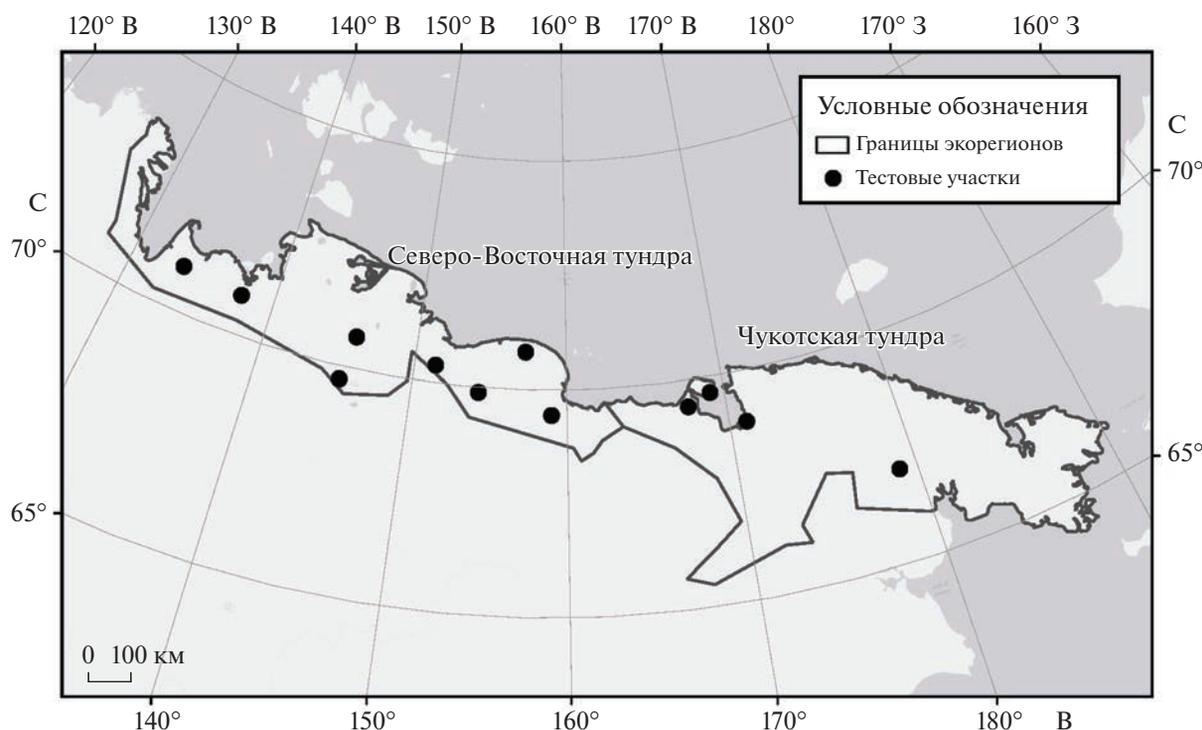


Рис. 1. Территория исследований в восточной части Российской Арктики с обозначенными границами двух арктических экорегионов.

бодны от ледового покрова, затрудняющего выделение озер в процессе дешифрирования снимков. Обработка космических снимков, проведенная с использованием стандартных средств геоинформационной системы QGIS 3.22, была направлена на получение данных о числе и площадях озер с существенно различающимися размерами с целью формирования гистограмм распределения озер в широком диапазоне размеров.

Для построения гистограмм распределения озер по размерам в исследуемых арктических экорегионах Северо-восточной и Чукотской тундр нами использовалась методика интеграции данных о численности и площадях озер, полученных по снимкам различного разрешения, которая описана в (Полищук и др., 2018) и выполняется в виде последовательности трех этапов. Далее дадим краткое изложение этой методики.

На 1-ом этапе выполнения методики для получения первой исходной гистограммы распределения озер сравнительно больших размеров для наиболее полного учета озер в восточной части Российской Арктики была составлена мозаика снимков Sentinel-2 за период 2017–2021 гг., с использованием которой были определены численность и суммарная площадь всех озер, которые дешифрированы на снимках Sentinel-2. Минимальный размер выделяемых на снимках озер был выбран равным $2 \times 10^3 \text{ м}^2$, соответствующий

размеру площади 5 пикселей, что позволяет достаточно достоверно выделять водоемы на снимке. Использовались снимки Sentinel-2 с выполненной атмосферной коррекцией (уровень обработки L2A) и пространственным разрешением 20 м. Определение озер на снимках производилось с применением индекса Automated Water Extraction Index (AWEI), использующего комбинацию спектральных каналов видимого (B02, B03) и инфракрасного (B8A, B11, B12) диапазонов. В результате обработки мозаики космических снимков Sentinel-2 средствами QGIS 3.22 были получены векторные слои термомарксовых озер на территории восточной части Российской Арктики, позволившие определить число и площади всех озер крупнее $2 \times 10^3 \text{ м}^2$. Полученные данные о числе озер на исследуемой территории, распределенные в соответствии с (Полищук и др., 2018) по частичным интервалам площадей в логарифмическом масштабе, представлены в виде первой исходной гистограммы распределения площадей озер с размерами от 2×10^3 до 10^8 м^2 .

На 2-ом этапе предусмотрено получение по снимкам высокого разрешения Канопус-В второй исходной гистограммы, включающей и озера малых размеров, не обнаруживаемых по снимкам Sentinel-2. На этом этапе для получения данных дистанционного исследования использовался метод тестовых (ключевых) участков. Обработка этих снимков проводилась средствами QGIS 3.22 на

Таблица 1. Общая характеристика проведенных исследований озер в разных экорегионах

Показатель	СВТ	ЧТ
Площадь экорегиона, км ²	249144	308728
Число ТУ на снимках Канопус-В	8	4
Количество озер по данным Sentinel-2	569733	1105470
Суммарная площадь озер, км ²	29307	4685
Степень заозеренности	0.122	0.018
Коэффициент экстраполяции	400	298

сценах в границах 12 тестовых участков (ТУ), число которых в исследованных экорегионах приведено в табл. 1. Выбранные тестовые участки имели приблизительно одинаковые размеры около 3000 га.

Тестовые участки выбирались нами, как принято в подобных исследованиях, в местах скопления термокарстовых озер, то есть в зонах, где существуют условия для формирования очагов термокарстовых процессов. На рис. 2 представлены для иллюстрации фрагменты снимков территории Чукотской тундры с показанными на них границами тестовых участков. Заметим, что тестовые участки достаточно равномерно покрывают территорию исследований в СВТ, что не удалось полностью обеспечить на территории ЧТ ввиду ограниченности объема безоблачных снимков Канопус-В исследуемой территории. Однако этот недостаток в нашем случае компенсируется путем полного покрытия территории ЧТ снимками Sentinel-2, содержащих также и информацию об озерах средних размеров.

При построении на 2-ом этапе другой исходной гистограммы распределения площадей озер, возникает важный методический вопрос распро-

странения данных, полученных по снимкам Канопус-В на отдельных тестовых участках, на всю исследуемую территорию отдельного экорегиона. Ниже кратко изложим основную идею объединения (интеграции) данных о распределении озер, полученных по снимкам разного разрешения, положенную в основу использованной методики (Полищук и др., 2018). Так как суммарные числа озер в интервалах первой исходной гистограммы определяются по мозаике снимков Sentinel-2, будем рассматривать эти значения как истинные. Будем также предполагать, 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.

С учетом выше изложенного представляется логичным потребовать, чтобы в интервалах в области перекрытия двух исходных гистограмм к этим значениям были бы близки (в среднем) экстраполируемые на всю территорию экорегиона значения суммарного (по всем тестовым участкам) числа озер в совпадающих интервалах гистограммы, определяемого по снимкам Канопус-В. Поэтому экстраполированные значения числа озер в частичных интервалах гистограммы могут быть получены умножением измеренных по снимкам Канопус-В значений суммарного числа озер на всех тестовых участках отдельного экорегиона на коэффициент экстраполяции, определяемый в виде:

$$K = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left(\frac{N_i}{n_i} \right),$$

где N_i и n_i – число экспериментально определенных озер по снимкам Sentinel-2 и Канопус-В соответственно в каждом i -ом интервале в области

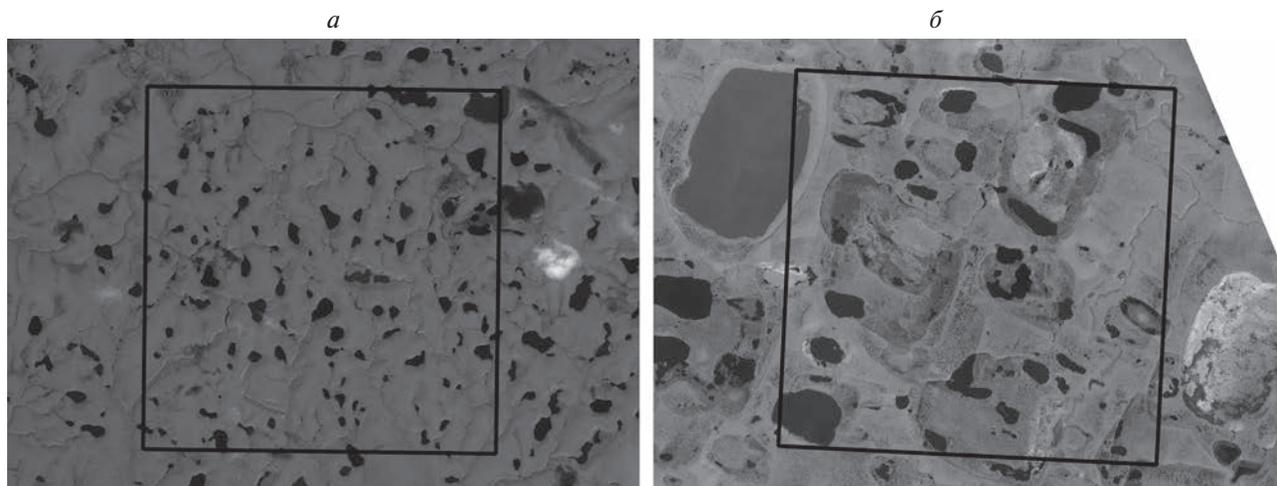


Рис. 2. Фрагменты космических снимков Канопус-В территории Чукотской тундры 09.08.2014 (а) и 22.08.2014 (б) с обозначенными границами тестовых участков.

перекрытия гистограмм, i – номер интервала в области перекрытия, p – число перекрывающихся интервалов.

В нашем случае исходные гистограммы имеют область перекрытия (наложения) интервалов шириной в 8 интервалов в диапазоне площадей 2×10^3 – 10^6 м², то есть $p = 8$ для обоих исследованных экорегионов, а соответствующие величины коэффициента экстраполяции K для разных экорегионов приведены в табл. 1. Полученные таким образом расчетные (экстраполированные) величины суммарного числа озер в каждом интервале гистограммы будут относиться ко всей территории отдельного исследуемого экорегиона и позволяют сформировать для этого экорегиона экстраполированную гистограмму распределения озер по снимкам Канопус-В как результат выполнения второго этапа. Аналогичным образом формируются экстраполированные данные для гистограммы по снимкам Канопус-В и для другого экорегиона.

На 3-ем заключительном этапе создается на основе объединения (синтеза) двух гистограмм, полученных на предыдущих этапах, интегрированная (синтезированная) гистограмма распределения площадей озер в очень широком диапазоне их размеров, включая и малые озера. Синтезированная гистограмма распределения площадей озер получается на основе “сшивания” двух указанных гистограмм в точке, соответствующей значению площади 2×10^3 . Полученные в результате такого “сшивания” на 3-м этапе синтезированные гистограммы для каждого из исследованных экорегионов будут представлять распределение озер в широком 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. Более подробно процедура “сшивания” гистограмм описана и проиллюстрирована графически в (Полищук и др., 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общая характеристика полученных результатов и проведенных исследований на территориях двух арктических экорегионов дана в табл. 1. В табл. 1 приняты следующие обозначения: СВТ – Северо-восточная тундра; ЧТ – Чукотская тундра. Степень заозеренности определялась как отношение суммарной площади озер на определенной территории к площади этой территории. Как следует из табл. 1, степень заозеренности и суммарная площадь озер на территории СВТ в несколько раз выше, чем в ЧТ.

Для исследования зависимости численности озер от их размеров на рис. 3 представлено семей-

ство графиков гистограмм распределения числа термокарстовых озер по интервалам их размеров на территориях исследованных восточных экорегионов. Как видно из рис. 3, графики демонстрируют сходный в общем характер поведения, который проявляется в увеличении численности озер с уменьшением их размеров на территории всех исследуемых экорегионов. Однако графики гистограмм для разных экорегионов проявляют индивидуальные особенности. Для рассмотрения этих особенностей выделим на оси абсцисс три диапазона размеров озер:

- 1 – менее 10^3 м² (0.1 га) – малые озера;
- 2 – от 10^3 до 10^5 м² – средние по размерам озера;
- 3 – более 10^5 м² (10 га) – большие озера.

В диапазоне больших озер, как видно из рис. 3, графики гистограмм показывают существенные различия в числе озер в одних и тех же интервалах площадей озер. Отметим, что в диапазоне больших озер в СВТ по сравнению с экорегионом ЧТ превышение числа озер в совпадающих интервалах их площадей составляет от нескольких до десятка раз и более. Это можно интерпретировать как проявление более существенного вклада больших озер в гистограмму распределения озер по размерам в СВТ по сравнению с ЧТ. Следовательно, на территории СВТ существенно преобладают большие озера по сравнению с ЧТ.

В диапазоне малых озер графики для обоих экорегионов, как и в случае с диапазоном больших озер, также значительно различаются по числу озер. Однако в этом диапазоне по сравнению с диапазоном больших озер наблюдается противоположная тенденция: численность озер ЧТ в несколько раз превышает число озер СВТ в совпадающих интервалах их площадей. Этот результат можно интерпретировать как проявление более существенного вклада малых озер в общую численность озер ЧТ по сравнению с СВТ. Следовательно, на территории ЧТ по сравнению с СВТ преобладают малые озера.

В диапазоне промежуточных значений размеров озер, обозначенном цифрой 2 на рис. 3, изменения числа озер слабее зависят от изменения их размеров, чем в диапазонах 1 или 3. И разброс величин числа озер на графиках гистограмм для разных экорегионов становится менее существенным, по крайней мере, по сравнению с разбросом в диапазоне больших озер. Заметим, что в диапазоне промежуточных значений размеров озер на территории СВТ, как и в диапазоне 3, преобладают озера больших по сравнению с ЧТ размеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В порядке обсуждения полученных результатов заметим, что заозеренность территории СВТ, по данным табл. 1, в 7 раз больше, чем в экореги-

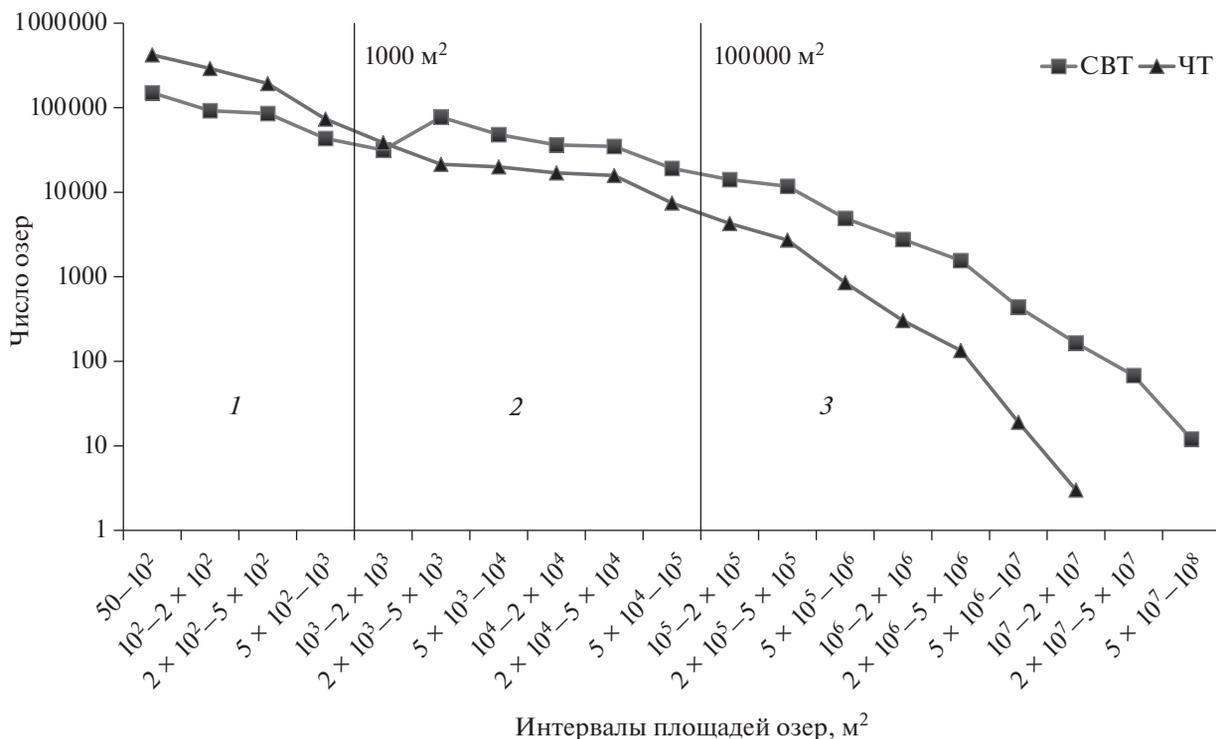


Рис. 3. Гистограммы распределения числа термокарстовых озер по интервалам их размеров на территориях двух исследованных экорегионов восточной части Российской Арктики на основе снимков Канопус-В и Sentinel-2. Полу- жирными цифрами 1, 2 и 3 обозначены характерные диапазоны размеров озер.

оне ЧТ. Несмотря на это, график гистограммы распределения числа озер в СВТ по виду практически не отличается от графика гистограммы на территории ЧТ, что позволяет сделать вывод об относительной однородности статистической структуры полей термокарстовых озер в арктической тундре восточных территорий Российской Арктики. Обращает на себя внимание, по данным рис. 3, что максимальные величины суммарных площадей озер в СВТ в диапазоне больших озер приблизительно на порядок превышают аналогичные значения в ЧТ. Следовательно, значительно более крупные озера дают основной вклад в суммарную площадь озер Северо-восточной тундры по сравнению с Чукотской тундрой. Это может быть результатом различий геоэкологических свойств рассматриваемых арктических территорий восточной части Российской Арктики.

Как было отмечено ранее, объем накопления парниковых газов в термокарстовых озерах исследуемой территории, согласно (Полищук и др., 2015), пропорционален суммарной площади озер на этой территории. Это позволяет на основе изложенных выше результатов анализа графиков на рис. 3 сделать важный вывод о значительно превышающих объемах накопления метана и углекислого газа в озерах Северо-восточной тундры по сравнению с озерами Чукотской тундры.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по проекту № 22-11-20023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н., Архипова М.В., Березин П.В., Зверев А.В., Панченко Е.Н., Садков С.А. Закономерности распределения размеров термокарстовых озер // Докл. АН. 2017. Т. 474. № 5. С. 625–627.
- Котляков В.М., Хаин В.Е., Гуцуляк В.Н., Данилов А.И. АРКТИКА // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2020). URL: <https://bigenc.ru/geography/text/3452274> Дата обращения: 15.06.2022.
- 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. 16. № 3. С. 9–17.
- 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 // Изв. Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 2. С. 12–135.
- Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lan-tuit H., Zimov S. Distribution of thermokarst lakes and

ponds at three yedoma sites in Siberia // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost (June 29–July 3, 2008). Fairbanks, Alaska. 2008. P. 551–556.

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.

Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia // Remote sensing. 2014. № 6. P. 621–636.

Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting // International Journal of Environmental Studies. 2009. V. 66. № 4. P. 423–431.

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., Rickerts 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. Iss. 11. P. 933–938.
[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/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.

Polishchuk Y.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Polishchuk V.Y., Lim A., Manasyrov R.M., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S. Minor contribution of small thaw ponds to the pools of carbon and methane in the inland waters of the permafrost – affected part of the Western Siberian lowland // Environmental Research Letters. 2018. V. 13. 045002. P. 1–16.
<https://doi.org/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. 10(1): 1552.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-09592-1>

Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget // Phil. Trans. R. Soc. 2007. V. 365. P. 1657–1676.

Zabelina S., Shirokova L., Klimov S., Chupakov A., Lim A., Polishchuk Y., Polishchuk V., Bogdanov A., Muratov I., Guerin F., Karlsson J., Pokrovsky O. Carbon Emission from Thermokarst Lakes in NE European Tundra // Limnology and Oceanography. 2020. 9999. P. 1–15.
<https://doi.org/10.1002/Ino.11560>

Zimov S.A., Voropaev Y.V., Semiletov I.P., Davidov S.P., Prosiannikov S.F., Chapin III F.S., Chapin M.C., Trumbore S., Tyler S. North Siberian lakes: a methane source fuelled by Pleistocene Carbon // Science. 1997. V. 277. P. 800–802.

Study of Thermokarst Lake Size Distribution in the Eastern Part of the Russian Arctic Based on Combining Sentinel-2 and Kanopus-V Images

I. N. Muratov¹, O. A. Baysalyamova¹, and Y. M. Polishchuk¹

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

The article is devoted to the issues of remote studies of the size distribution of thermokarst lakes in the territory of the eastern part of the Russian Arctic. The studies were carried out in the Arctic territories of the Northeastern (Yakutia) and Chukotka tundras, which represent relatively homogeneous areas in terms of their natural properties, referred to here as ecoregions. Remote studies of the distribution of thermokarst lakes by area were conducted using satellite images from the Kanopus-B and Sentinel-2 (with spatial resolution of 2.1 and 20 m, respectively), obtained in the summer months of 2017–2021. The lakes were interpreted using Sentinel-2 satellite image mosaic, which provides full coverage of the study territories, Kanopus-B images at 12 test sites, and QGIS 3.22 tools. We briefly described the method of integration (combination) of data from Kanopus-B and Sentinel-2 images for plotting synthesized histograms of lakes distribution by their sizes. The technique allowed us to get histograms of lake distribution in a very wide range of their sizes from 50 to 10⁸ m² in the studied Arctic ecoregions. The histogram plots show a similar behavior in both ecoregions, manifesting itself in an increase in the number of lakes as their size decreases. It is shown that the main contribution to the number of lakes in the Northeastern tundra is made by much larger lakes than in the Chukchi tundra, which may indicate a significant difference in the geocryological conditions in different Arctic territories of the eastern part of the Russian Arctic. The degree of the lakeing of the territories was assessed. It was shown that the lakeing of the Northeastern tundra is 7 times higher than in the studied territories of Chukotka.

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

REFERENCES

Viktorov A.S., Kapralova V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Arkhipova M.V., Berezin P.V., Zverev A.V., Panchenko E.N., Sadkov S.A. Zakonomernosti raspredeleniya razmerov

termokarstovoykh ozer [Regularities in the size distribution of thermokarst lakes], Doklady Akademii nauk, 2017. V. 474. № 5. P. 625–627. (In Russian).

Kotlyakov V.M., Khain V.E., Gutsulyak V.N., Danilov A.I. АРКТИКА, Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya. Elek-

- tronnaya versiya [The Great Russian Encyclopedia. Electronic version], available at: <https://bigenc.ru/geography/text/3452274>. (In Russian).
- Polishchuk Yu.M., Bogdanov A.N., Bryksina N.A., Muratov I.N., Polishchuk V.Yu.* Integratsiya kosmicheskikh snimkov sverkhvysokogo i srednego razresheniya dlya postroeniya gistogramm raspredeleniya ploshchadei termokarstovykh ozer v rasshirennom diapazone ikh razmerov [Integration of ultrahigh and medium resolution space images to build histograms of thermokarst lake area distribution in an extended range of their sizes], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. V. 16. № 3. P. 9–17. (In Russian).
- Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu., 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 estimating methane reserves in small thermokarst lakes in the permafrost zone of Western Siberia], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2015. V. 326. № 2. P. 12–135. (In Russian).
- Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lantuit H., Zimov S.* Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia, *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost (June 29–July 3, 2008)*, Fairbanks, Alaska. 2008. P. 551–556.
- 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.
- Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G.* Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia, *Remote sensing*. 2014. № 6. P. 621–636.
- Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N.* Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting, *International Journal of Environmental Studies*. 2009. V. 66. № 4. P. 423–431.
- 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., Rickerts 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. Iss. 11. P. 933–938. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOT-WA\]2.0.CO;2](https://doi.org/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.
- Polishchuk Y.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Polishchuk V.Y., Lim A., Manasyrov R.M., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S.* Minor contribution of small thaw ponds to the pools of carbon and methane in the inland waters of the permafrost – affected part of the Western Siberian lowland, *Environmental Research Letters*. 2018. V. 13. 045002. P. 1–16. <https://doi.org/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. 10(1): 1552. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09592-1>
- Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S.* Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget, *Phil. Trans. R. Soc.*, 2007. V. 365. P. 1657–1676.
- Zabelina S., Shirokova L., Klimov S., Chupakov A., Lim A., Polishchuk Y., Polishchuk V., Bogdanov A., Muratov I., Guerin F., Karlsson J., Pokrovsky O.* Carbon Emission from Thermokarst Lakes in NE European Tundra, *Limnology and Oceanography*. 2020. 9999. P. 1–15. <https://doi.org/10.1002/Ino.11560>
- Zimov S.A., Voropaev Y.V., Semiletov I.P., Davidov S.P., Prosiannikov S.F., Chapin III F.S., Chapin M.C., Trumbore S., Tyler S.* North Siberian lakes: a methane source fuelled by Pleistocene Carbon, *Science*. 1997. V. 277. P. 800–802.