

УДК 551.345:528.88

ОБОБЩЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДЕЙ МАЛЫХ ОЗЕР В КРИОЛИТОЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Полищук Юрий Михайлович^{1,2},
yupolishchuk@gmail.com

Богданов Александр Николаевич¹,
albo06@yandex.ru

Муратов Ильдар Наильевич¹,
ildarmur@gmail.com

Полищук Владимир Юрьевич^{3,4},
liquid_metal@mail.ru

¹ Центр дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий»,
Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151.

² Институт химии нефти СО РАН,
Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4.

³ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 8/3.

⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена необходимостью уточнения вида закона распределения размеров озер для оценки эмиссии метана из малых термокарстовых озер на обширных территориях криолитозоны. В настоящее время гистограммы этих распределений получают по космическим снимкам на отдельных тестовых участках, что вызывает сложности в определении вида закона распределения озер на территории криолитозоны, из-за отсутствия методологии обобщения эмпирических гистограмм распределения размеров озер, полученных на ограниченной совокупности тестовых участков, на всю территорию исследований.

Цель работы: изложение методических вопросов определения закона распределения площадей малых термокарстовых озер в криолитозоне в широком диапазоне их размеров на основе обобщения гистограмм распределения озер по площадям, получаемых по космическим снимкам на ограниченной совокупности тестовых участков на территории исследований.

Методы исследования: дистанционные методы исследования полей термокарстовых озер с использованием спутниковых снимков; метод тестовых (ключевых) участков; метод определения зон активного термокарста с использованием спутниковых снимков; методы геоинформационных систем для пространственного анализа данных о термокарстовых озерах, полученных из спутниковых изображений.

Результаты. Рассмотрены методические вопросы обобщения эмпирических гистограмм распределения озер по площадям, полученным по снимкам высокого разрешения на ограниченной совокупности тестовых участков, на всю территорию исследований с целью определения вида закона обобщенного распределения озер по площадям. Предлагаемый подход к построению эмпирических гистограммы основан на использовании снимков высокого разрешения Канопус-В, БКА и ALOS, отражающих распределения малых озер. Дистанционные исследования проведены на 66 тестовых участках, расположенных достаточно равномерно на территории криолитозоны Западной Сибири. Обобщенная гистограмма распределения озер по площадям в криолитозоне, представленная в виде графика в двойном логарифмическом масштабе, обеспечивающем ее компактное представление в очень широком диапазоне изменения размеров озер, допускает линейную аппроксимацию, что подтверждает степенной вид обобщенного распределения озер в криолитозоне Западной Сибири.

Ключевые слова:

Вечная мерзлота, геоинформационные системы, термокарстовые озера, спутниковые снимки, статистическое распределение площадей озер, тестовые участки, зоны активного термокарста.

Введение

Для решения задач климатического прогноза и, в частности, для оценки и прогнозирования объемов эмиссии парниковых газов из термокарстовых озер в зонах многолетней мерзлоты необходимы знания о законах распределения озер по площадям [1–4]. Ввиду труднодоступности и высокой степени заболоченности территории в зонах мер-

злоты получение таких данных без применения методов дистанционного зондирования поверхности Земли невозможно.

В последнее время проведены дистанционные исследования распределения площадей термокарстовых озер в Сибири и в некоторых других северных регионах [5–9]. В большинстве этих исследований использовались космические снимки сред-

него разрешения (30 м) Landsat, обеспечивающие многократное полное покрытие земного шара. Но на этих снимках не обнаруживаются озера малых размеров. Поэтому полученные по этим данным эмпирические распределения площадей озер не учитывают вклад малых термокарстовых озер, концентрация метана в которых, согласно [10], более чем на порядок превышает его концентрацию в озерах с размерами более 0,1–0,5 га.

В ряде работ, например [11, 12], для изучения распределений термокарстовых озер в зоне мерзлоты использовались снимки высокого и сверхвысокого разрешения. Однако эти снимки из-за малой полосы охвата территории обеспечивают сравнительно небольшое покрытие исследуемой территории, что позволяет изучить распределение площадей озер лишь на небольших по размерам территориях в пределах тестовых участков. Для оценки запасов метана в термокарстовых озерах на обширных территориях криолитозоны, как следует из [2, 4], необходимо использовать знания о распределении озер на всей исследуемой территории. Методические вопросы определения таких законов распределения озер по ограниченным данным о числе и площадях озер, полученным на небольшом числе тестовых участков на исследуемой территории, в настоящее время не разработаны.

В связи с изложенным, целью настоящей работы явилось исследование методических вопросов построения гистограмм обобщенного распределения озер по площадям, получаемых с помощью космических снимков высокого разрешения, на примере термокарстово-озерных равнин криолитозоны Западной Сибири.

Данные и методы исследования

Согласно [13] образование термокарстовых озер происходит под воздействием нескольких факторов, главными из которых являются наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород и равнинный характер территории. В [14, 15] на основе геоморфологического и климатического анализа вся криолитозона Западной Сибири отнесена к числу районов с повсеместным распространением термокарстовых озер. Поэтому озера, исследуемые в настоящей работе дистанционным методом, рассматриваются как термокарстовые озера.

Исследования распределения озер в настоящей работе проводились в криолитозоне Западной Сибири с использованием космических снимков высокого разрешения Канопус-В (2,1 м), БКА (2,1 м) и ALOS (2,5 м). Все снимки выбирались в достаточно короткий период летнего сезона (конец июня – август) для минимизации влияния сезонных колебаний уровня воды в озерах. В этот период полностью исчезает ледовый покров на озерах, мешающий их выделению при дешифрировании снимков. Обработка космических снимков, проведенная с использованием стандартных средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3, была на-

правлена на получение данных о численности и площадях озер для построения гистограммы распределения озер по площадям, которая представляет преимущественно озера небольших размеров.

В связи с необходимостью получения распределения площадей озер в достаточно широком диапазоне изменения их размеров (от десятков м² до десятков га) на основе снимков высокого разрешения предлагается для построения гистограмм выбирать частичные интервалы с неравномерным шагом (по логарифмическому закону), а именно: 50–100 м², 100–200 м², 200–500 м², 500–1000 м² и т. д. до 20 га. Заметим, что определение ширины указанных интервалов в логарифмическом масштабе (50, 100, 300, 500 м² и т. д.) позволяет компактно представить гистограмму распределения озер в достаточно широком диапазоне изменений площадей озер.

При получении другой исходной гистограммы, представляющей озера преимущественно малых размеров, основанной на снимках высокого разрешения, использовался метод тестовых (ключевых) участков. Обработка снимков высокого разрешения Канопус-В, БКА и ALOS проводилась на сценах в границах 66 тестовых участков, достаточно равномерно распределенных по территории островной, прерывистой и сплошной криолитозон Западной Сибири. Краткая характеристика этих участков и использованных в работе снимков высокого разрешения (ВР) дана в табл. 1, а на рис. 1 представлена схема размещения тестовых участков на исследуемой территории.

Таблица 1. Характеристика тестовых участков (ТУ) и космических снимков ВР

Table 1. Characteristics of the test sites (TS) and high resolution satellite images

Криолитозона Cryolithozone	Съемочный аппарат Satellite	Количество ТУ TS quantity	Номера ТУ TS numbers	Средняя площадь ТУ Average area of TS	Период съемки Date of shooting
Островная Sporadic	Канопус-В	29	1–29	2845	2013–2014
	ALOS	3	30–32	3355	2007–2008
Прерывистая Discontinuous	Канопус-В	18	33–50	3125	2013–2014
Сплошная Continuous	Канопус-В	11	51–61	3210	2014–2015
	ALOS	5	62–66	2910	2008

Выбранные тестовые участки, как видно из табл. 1, имеют приблизительно одинаковые размеры. Суммарная площадь всех ТУ составляет около 0,2 млн га, что соответствует 0,002 % от всей площади криолитозоны Западной Сибири, покрываемой снимками среднего разрешения (СР), использованными для формирования мозаики. В связи с этим возникает важный методический вопрос: как распространить полученные на отдельных тестовых

вых участках данные о площадях малых озер, полученные на основе снимков ВР, на всю территорию исследований с целью построения гистограммы распределения площадей озер малых размеров в криолитозоне Западной Сибири?

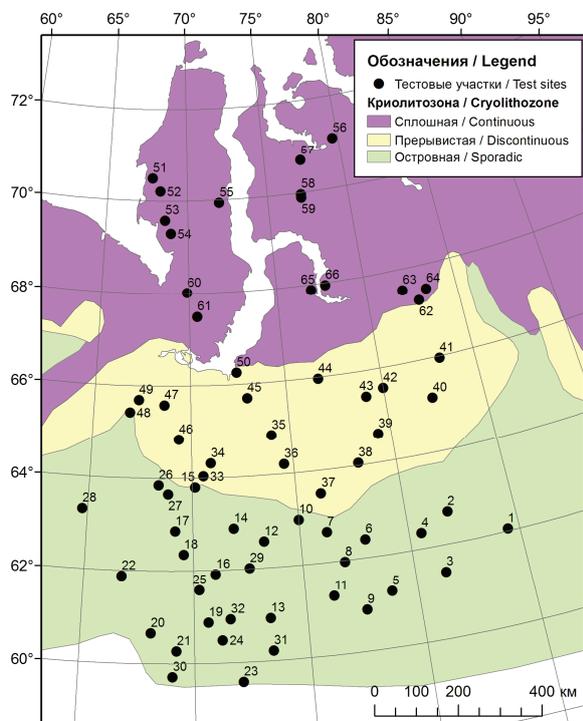


Рис. 1. Схема размещения тестовых участков в криолитозоне Западной Сибири

Fig. 1. Scheme of location of test sites in cryolithozone of Western Siberia

Тестовые участки выбирались нами, как принято в подобных исследованиях, в местах скопления термокарстовых озер, т. е. в зонах, где существуют условия для формирования и развития очагов термокарстовых процессов [5]. Будем далее для краткости называть их зонами активного термокарста. Эти зоны занимают лишь часть территории криолитозоны Западной Сибири. Поэтому, в предположении об отсутствии озер вне границ этих зон, данные о числе и суммарной площади озер, полученные на тестовых участках, следует экстраполировать не на всю территорию криолитозоны, а только на ее часть, занятую зонами активного термокарста. В связи с этим необходимо определить общую площадь всех зон активного термокарста в криолитозоне Западной Сибири.

Методология формирования картографического слоя границ зон активного термокарста (АТ) с использованием снимков Landsat-8 описана в [16], согласно которой границы зон активного термокарста определяются как контуры, ограничивающие пространственные ассоциации (совокупности) озер и полученные путем объединения (агрегирования) близко расположенных друг к другу озер на снимках Landsat-8 (рис. 1). Эта процедура автоматиче-

ского определения границ зон АТ выполняется, согласно [16], с использованием инструмента пространственного анализа Aggregate Polygons [17] в программном комплексе ArcGIS 10.3.

Такой подход к определению зон АТ предполагает, что кроме хорошо обнаруживаемых по космоснимкам Landsat термокарстовых озер сравнительно больших размеров на исследуемой территории будут присутствовать также и малые озера (с размерами менее 0,2–0,3 га), не различимые на снимках СР, но которые будут хорошо видны на снимках высокого разрешения (ВР). Поэтому при автоматическом определении границ зон АТ по снимкам среднего разрешения возникают ошибки двух видов [16]: *ошибки занижения* общей площади автоматически определяемых границ зон АТ из-за пропуска малых озер при выборе слишком малого расстояния между озерами d (рис. 2) и *ошибки завышения* общей площади зон активного термокарста как результат включения в зону АТ участков территории, на которых вообще отсутствуют озера, при выборе слишком большого расстояния d .

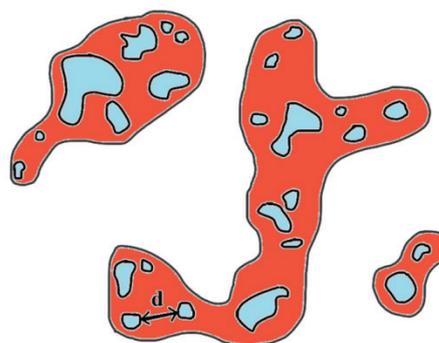


Рис. 2. Определение границ зон активного термокарста путем агрегирования озер

Fig. 2. Formation of borders of active thermokarst areas using lakes aggregation

Путем имитационных экспериментов, проведенных в [16] на различных участках исследуемой территории по снимкам Landsat-8 с использованием снимков ВР Канопус-В, было определено оптимальное расстояние d , минимизирующее указанные ошибки. При определении величины оптимального расстояния была использована процедура пространственного анализа, изложенная в [18, 19]. С учетом оптимальной величины d на основе мозаики снимков Landsat-8 были определены границы зон АТ на территории криолитозоны Западной Сибири, общая площадь которых составила 24,48 млн га. На основе экстраполяции экспериментальных данных о суммарной площади озер (S_p), полученных на тестовых участках по снимкам ВР, расчетная величина суммарной площади озер (S_p) на общей территории всех зон АТ может быть определена в виде

$$S_p = S_o \cdot t, \quad (1)$$

где $t=S_{AT}/S_{TY}$ (S_{AT} – общая (суммарная) площадь зон активного термокарста; S_{TY} – суммарная площадь тестовых участков).

Расчетное число озер N_p в зонах АТ будем определять аналогично (1) в виде

$$N_p = N_o \cdot t, \quad (2)$$

где N_o – экспериментально определенное (по снимкам ВР) число озер на всех ТУ.

Расчитанные по формулам (1) и (2) число озер N_p и величину их общей площади S_p на территории всех зон АТ следует относить (в предположении об отсутствии озер вне зон АТ) ко всей территории криолитозоны Западной Сибири. Распределение величин N_p и S_p по интервалам площадей в диапазоне от 50 м² до 20 га будет использовано далее при формировании гистограммы распределения озер (преимущественно малых размеров) на основе снимков ВР.

Построение гистограммы обобщенного распределения площадей озер

Перейдем к получению гистограммы распределения озер на основе снимков высокого разрешения. В результате обработки этих снимков на 66 тестовых участках исследуемой территории были получены в широком диапазоне изменения площадей озер (от 0,005 до 20 га) следующие экспериментальные данные о числе и суммарной площади озер: $N_o=60350$ и $S_o=57997$ га. Учитывая, что в нашем случае коэффициент $t=121$, путем экстраполяции величин N_o и S_o на территорию криолитозоны Западной Сибири с использованием формул (1) и (2) получим расчетные величины N_p и S_p для исследуемой территории. Так, число озер сравнительно малых размеров N_p , определяемое на основе снимков ВР на территории криолитозоны Западной Сибири, составляет около 7,3 млн, что на порядок превышает число озер, определенное на этой территории по снимкам СР. Общая площадь озер малых размеров S_p на этой же территории оценивается по снимкам ВР, согласно (1), величиной 6,5 млн га, сравнимой с общей площадью озер, определенной по снимкам СР (около 6 млн га). Распределяя число озер, найденных на исследуемой территории на основе снимков ВР в соответствии с (1) и (2), по интервалам площадей, получим искомую другую исходную гистограмму распределения площадей озер, которая отображается серыми столбиками на рис. 3 в диапазоне изменения площадей от 0,005 до 20 га.

Как видно в табл. 2, суммарная численность озер с размерами от 50 м² до 20 га в криолитозоне Западной Сибири оценивается величиной, превышающей 6,9 млн, а их суммарная площадь на исследуемой территории составляет 3 млн га. Отметим, что на рис. 3 цифры над столбиками гистограммы обозначают величину относительного числа озер в каждом частичном интервале гистограммы, определяемую в виде

$$k_i = n_i / N, \quad (3)$$

где n_i – число озер в i -м частичном интервале; N – суммарное число озер во всех интервалах обобщенной гистограммы в широком диапазоне изменения площадей озер – от 50 м² до 20 га.

Таблица 2. Распределение суммарных величин числа и площади озер с размерами до 20 га по интервалам их площадей

Table 2. Distribution of the total number and area of lakes under 20 ha by intervals of areas

Интервал площадей озер Interval of lake areas, га/ha	Суммарное число озер Total number of lakes	Относительное число озер k_i , % Relative number of lakes k_i , %	Суммарная площадь озер Total area of lakes, 1×10^3 га/ha	Кол-во единичных интервалов Number of unit intervals	Нормированное число озер Normalized number of lakes w_i , %
0,005–0,01	1111990	16,2	7,913	1	54,2
0,01–0,02	1064679	15,4	15,207	2	25,9
0,02–0,05	1308978	18,9	42,237	5	12,7
0,05–0,1	895037	13,0	63,775	10	4,4
0,1–0,2	740641	10,7	105,310	20	1,8
0,2–0,5	752136	10,9	240,198	50	0,7
0,5–1	411521	6,0	291,723	100	0,2
1–2	284592	4,1	399,414	200	0,07
2–5	223729	3,2	686,689	500	0,022
5–10	78166	1,1	544,470	1000	0,004
10–20	43560	0,6	610,226	2000	0,001
Итого	6915029	100,0	3007,163	3888	100



Рис. 3. Обобщенная гистограмма распределения озер с размерами до 20 га в криолитозоне Западной Сибири по снимкам высокого разрешения

Fig. 3. Generalized histogram of distribution of lakes under 20 ha in the cryolithozone of Western Siberia, obtained by high-resolution satellite imagery

Приведенная выше обобщенная гистограмма распределения озер представлена, согласно [20], в виде гистограммы относительных частот. Переходя в каждом i -ом частичном интервале гистограммы к нормированным частотам

$$w_i = k_i / h_i, \quad (4)$$

где h_i – ширина i -го интервала, получим, в терминологии [20], нормированную гистограмму обобщенного распределения площадей озер в криолитозоне Западной Сибири, приведенную на рис. 4.



Рис. 4. Нормированная гистограмма распределения площадей озер в криолитозоне Западной Сибири по снимкам высокого разрешения

Fig. 4. Normalized histogram of lakes distribution in the cryolithozone of Western Siberia, obtained with by high-resolution satellite imagery

Определение вида закона распределения озер по площадям

График гистограммы распределения озер по площадям на рис. 4 представлен в двойном логарифмическом масштабе для проверки соответствия эмпирического распределения степенному закону в виде

$$w = A \cdot s^B, \quad (5)$$

где w – относительное число озер в интервалах гистограммы; s – площадь водной поверхности озер; A, B – коэффициенты степенной функции.

Как показано в [21], в случае степенного вида закона распределения озер по площадям графики гистограмм эмпирического распределения озер в двойном логарифмическом масштабе будут представляться линейными функциями. Действительно, прологарифмировав левую и правую части уравнения (5) и вводя подстановки $\lg w = y$ и $\lg s = x$, приводим (5) к линейному виду:

$$y = \lg A + Bx. \quad (6)$$

Уравнение (6) демонстрирует линейную зависимость логарифма относительного числа озер от логарифма величины их площадей на графиках гистограмм, представленных в двойном логарифмическом масштабе. На рис. 5 точками показаны значения нормализованного числа озер в интервалах гистограммы распределения озер по площадям, а прямая линия отображает график аппроксимирующей зависимости, полученной с высоким уровнем достоверности (коэффициент детерминации 0,99) в виде (6), что может служить подтверждением степенного закона распределения озер по площадям в виде (5). Из уравнения аппроксимации, приведенного в поле графика на рис. 5, определим следующие величины коэффициентов степенного закона распределения озер по площадям для территории криолитозоны Западной Сибири:

$$A = 0,096; B = -1,41.$$

Этот результат подтверждается данными о степенном виде закона распределения малых термокарстовых озер, полученными в исследованиях [21] на нескольких тестовых участках в сплошной

зоне мерзлоты. Заметим, что степенному закону также удовлетворяет и распределение озер по размерам в глобальном масштабе [22, 23]. Приведенные в статье результаты дистанционных исследований полей термокарстовых озер показывают, что и в исследованиях регионального масштаба на территории мерзлоты Западной Сибири по снимкам высокого разрешения распределение озер можно принимать соответствующим степенному закону, как и распределение площадей озер планеты. Следовательно, разработанный подход к построению обобщенных гистограмм позволяет определять вид закона распределения площадей малых термокарстовых озер на обширных территориях мерзлоты по спутниковым данным на ограниченном числе тестовых участков. Полученные результаты могут быть полезны в задачах прогнозирования запасов метана в термокарстовых водоемах и эмиссии метана в атмосферу в зонах многолетней мерзлоты северных регионов в условиях продолжающегося глобального потепления.

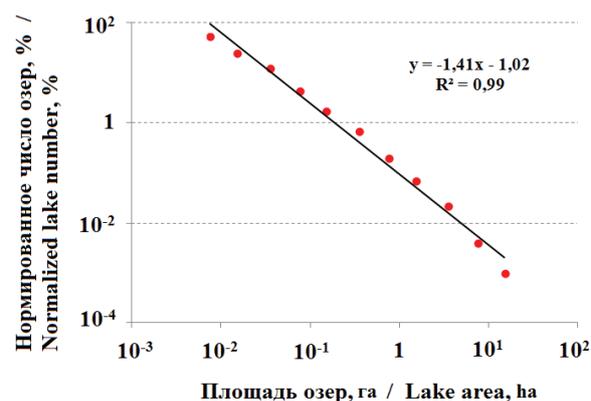


Рис. 5. Аппроксимация нормированной гистограммы обобщенного распределения площадей озер в криолитозоне Западной Сибири

Fig. 5. Approximation of normalized histogram of generalized lake size-distribution in cryolithozone of Western Siberia

Заключение

В статье рассмотрены вопросы использования космических снимков высокого пространственного разрешения для исследования распределения площадей термокарстовых озер на территориях многолетней мерзлоты в широком диапазоне изменений размеров озер. Для проведения исследований в работе использованы спутниковые снимки Канопус-В, БКА и ALOS высокого пространственного разрешения, позволившие с использованием средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3 определить численность и площади большого числа озер на 66 тестовых участках приблизительно одинаковых размеров. Выбранные для исследования тестовые участки были достаточно равномерно размещены на территориях островной, прерывистой и сплошной криолитозон Западной Сибири.

Предложен подход к экстраполяции данных о численности и площадях термокарстовых озер, полученных на исследованной совокупности тестовых участков, на всю территорию криолитозоны с целью получения обобщенной гистограммы распределения площадей озер сравнительно малых размеров с использованием снимков высокого разрешения. Подход основан на применении методологии определения зон активного термокарста. С использованием этого подхода была построена обобщенная гистограмма распределения площадей

озер в широком диапазоне их изменения – от 50 м² до 20 га.

Полученная гистограмма обобщенного распределения площадей озер в криолитозоне Западной Сибири может быть использована для оценки объемов накопления парниковых газов в термокарстовых озерах исследуемой территории, определения вида закона распределения площадей озер в зонах мерзлоты, а также для решения задач климатического прогноза и др.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 15-45-00075).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Methane dynamics in different boreal lake types / S. Juutinen, M. Rantakari, P. Kortelainen, J.T. Huttunen, T. Larmola, J. Alm, J. Sivola, P.J. Martikainen // *Biogeosciences*. – 2009. – № 6. – P. 209–223.
2. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH₄ flux upscaling / A.F. Sabrekov, B.R.K. Runkle, M.V. Glagolev, I.E. Kleptsova, S.S. Maksyutov // *Environ. Res. Lett.* – 2014. – № 9. – P. 1–9.
3. 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.
4. Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озерах в зоне мерзлоты Западной Сибири / Ю.М. Полищук, В.Ю. Полищук, Н.А. Брыксина, О.С. Покровский, С.Н. Кирпотин, Л.С. Широкова // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 127–135.
5. Викторов А.С., Капранова В.Н., Трапезникова О.Н. Математическая модель морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин в изменяющихся климатических условиях // *Криосфера Земли*. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 26–34.
6. 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.
7. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6 // *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems* / Ed. by O. Pokrovsky. – NY: Nova Science Publishers, 2014. – P. 205–234.
8. 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.
9. Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // *Криосфера Земли*. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 114–120.
10. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia / O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, S. Audry, J. Viers, B. Dupre // *Biogeosciences*. – 2011. – V. 8. – P. 565–583.
11. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia / G. Grosse, V. Romanovsky, K. Walter, A. Morgenstern, H. Lantuit, S. Zimov // *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost*. – Fairbanks, Alaska, June 29 – July 3, 2008. – P. 551–556.
12. Polishchuk Y.M., Bryksina N.A., Polishchuk V.Y. Remote analysis of changes in the number and distribution of small thermokarst lakes by sizes in Cryolithozone of Western Siberia // *Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2015. – V. 51. – № 9. – P. 999–1006.
13. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. – М.: Наука, 2006. – 252 с.
14. Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озер в России // *Вестник Московского университета. Сер. «География»*. – 2009. – № 3. – С. 33–42.
15. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменения размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // *Криосфера Земли*. – 2009. – Т. 13. – № 2. – С. 16–26.
16. Полищук Ю.М., Богданов А.Н. Зоны активного термокарста на территории многолетней мерзлоты и их выявление по космическим снимкам // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 104–114.
17. Aggregate polygons. URL: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//00130000003p000000> (дата обращения: 25.06.2016).
18. Getis A., Ord J.K. The analysis of spatial association by use of distance statistics // *Geographical analysis*. – 1992. – V. 24. – № 3. – P. 189–206.
19. Ord J.K., Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application // *Geographical analysis*. – 1995. – V. 27. – № 4. – P. 286–306.
20. Полигон и гистограмма. URL: <http://umk.portal.kemsu.ru/uch-mathematics/papers/posobie/t4-3.htm> (дата обращения: 27.06.2016)
21. Полищук Ю.М., Муратов И.Н., Полищук В.Ю. Исследование полей малых термокарстовых озер в зоне сплошной мерзлоты Западной Сибири по спутниковым снимкам высокого разрешения // *Оптика атмосферы и океана*. – 2016. – Т. 29. – № 7. – С. 592–597.
22. Downing J.A., Prairie Y.T. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments // *Limnol. Oceanogr.* – 2006. – V. 51. – P. 2388–2397.
23. A global inventory of lakes based on high resolution satellite imagery / C. Verpoorter, T. Kutser, D.A. Seekel, L.J. Tranvik // *Geophys. Res. Lett.* – 2014. – V. 41. – P. 1–7.

Поступила 23.07.2016 г.

Информация об авторах

Полищук Ю.М., доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Центра дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий»; главный научный сотрудник научно-исследовательского информационного центра Института химии нефти СО РАН.

Богданов А.Н., главный специалист Центра дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий».

Муратов И.Н., главный специалист Центра дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий».

Полищук В.Ю., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; ассистент кафедры вычислительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.345:528.88

GENERALIZED HISTOGRAM OF LAKE SIZE-DISTRIBUTION IN PERMAFROST OF WESTERN SIBERIA BASED ON SATELLITE IMAGES OF HIGH RESOLUTION

Yury M. Polishchuk^{1,2},
yupolishchuk@gmail.com

Alexander N. Bogdanov¹,
albo06@yandex.ru

Ildar N. Muratov¹,
ildarmur@gmail.com

Vladimir Yu. Polishchuk^{3,4},
liquid_metal@mail.ru

¹ Ugra Research Institute of Information Technology,
151, Mira Street, Khanty-Mansiysk, 628011, Russia.

² Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS,
4, Akademichesky Avenue, Tomsk, 634021, Russia.

³ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS,
8/3, Akademichesky Avenue, Tomsk, 634021, Russia.

⁴ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the research is caused by the need to clarify the type of law of lakes size-distribution for estimating methane emission from small thermokarst lakes in vast areas of permafrost. Currently, the histograms of the distributions are obtained by satellite images on separate test sites. This causes difficulty in determining the type of lakes distribution law on all the territory of the permafrost zone, due to the lack of methodology of generalizing the empirical histograms of lake distribution, obtained on a limited set of test sites, on the entire territory of research.

The main aim of the research is to develop the methodological issues of determining the law of distribution of small thermokarst lakes areas in permafrost in a wide range of sizes based on generalization of the lakes size-distribution histograms, obtained by satellite images on a limited set of test sites, on the study territory.

Methods: remote study of thermokarst lakes fields based on satellite imagery; method of test (key) sites; method for determining the active thermokarst areas using satellite imagery; methods of geographic information systems for spatial analysis of data on thermokarst lakes.

Results. The authors have considered the methodical issues of generalizing empirical histograms of lakes size-distribution, obtained by high-resolution images on a limited set of test sites, on the entire territory of studies, to determine the type of law of the generalized lakes size-distribution. The proposed approach to construction of empirical histograms is based on application of high resolution images of Canopus-V, ALOS and BKA, reflecting the distribution of small lakes. Remote study was carried out at 66 test sites located quite evenly on the territory of the permafrost zone of Western Siberia. The linear approximation of generalized histogram of lakes size-distribution in permafrost territory, represented as a graph in double logarithmic scale, providing its compact representation in a very wide range of changes in lake sizes, confirms the power form of generalized size-distribution of lakes in the permafrost zone of Western Siberia.

Key words:

Permafrost, geoinformation systems, thermokarst lakes, satellite images, statistical size-distribution of lakes, test sites, area of active thermokarst.

The research was supported by RFBR grant (project No. 15–45–00075).

REFERENCES

1. Juutinen S., Rantakari M., Kortelainen P., Huttunen J.T., Larmola T., Alm J., Sivola J., Martikainen P.J. Methane dynamics in different boreal lake types. *Biogeosciences*, 2009, no. 6, pp. 209–223.
2. Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Maksyutov S.S. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH₄ flux upscaling. *Environ. Res. Lett.*, 2014, no. 9, pp. 1–9.
3. 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, vol. 365, pp. 1657–1676.
4. Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu., Bryksina N.A., Pokrovskiy O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S. Methodical issues for evaluating methane reserves in small thermokarst lakes in the permafrost of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 127–135. In Rus.

5. Viktorov A.S., Kapranova V.N., Trapeznikova O.N. Mathematical model of lacustrine-thermokarst plain morphostructure under the changing climatic conditions. *Cryosphere of Earth*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 26–34. In Rus.
6. 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, no. 6, pp. 621–636.
7. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M., Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6. *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems*. Ed. by O. Pokrovsky. New York, Nova Science Publishers, 2014. pp. 205–234.
8. 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, vol. 66, no. 4, pp. 423–431.
9. Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Analysis of changes in the number of thermokarst lakes in permafrost of Western Siberia on the basis of satellite images. *Cryosphere of Earth*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 114–120. In Rus.
10. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Vieters J., Dupre B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia. *Biogeosciences*, 2011, vol. 8, pp. 565–583.
11. 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*. Fairbanks, Alaska, June 29 – July 3, 2008. pp. 551–556.
12. Polishchuk Y.M., Bryksina N.A., Polishchuk V.Y. Remote analysis of changes in the number and distribution of small thermokarst lakes by sizes in Cryolithozone of Western Siberia. *Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 9, pp. 999–1006.
13. Viktorov A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoy morfologii landshafta* [Key issues of landscape mathematical morphology]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 252 p.
14. Kravtsova V.I. Dissemination of thermokarst lakes in Russia. *Vestnik of Moscow State University. Geography*, 2009, no. 3, pp. 33–42. In Rus.
15. Kravtsova V.I., Bystrova A.G. Changes of thermokarst lake areas in different regions of Russia for the last three decades. *Cryosphere of Earth*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 16–26. In Rus.
16. Polishchuk Yu.M., Bogdanov A.N. Zony aktivnogo termokarsta na territorii mnogoletnei merzloty i ikh vyyavlenie po kosmicheskim snimkam, (Active thermokarst zones on permafrost territory and their detecting on space images). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 12, pp. 104–114. In Rus.
17. *Aggregate Polygons*. Available at: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//00130000003p000000> (accessed 25 June 2016).
18. Getis A., Ord J.K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical analysis*, 1992, vol. 24, no. 3, pp. 189–206.
19. Ord J.K., Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical analysis*, 1995, vol. 27, no. 4, pp. 286–306.
20. *Polygon and histogram*. Available at: <http://umk.portal.kemssu.ru/uch-mathematics/papers/posobie/t4-3.htm> (accessed 27 June 2016).
21. Polishchuk Yu.M., Muratov I.N., Polishchuk V.Yu. Research of fields of small thermokarst lakes in continuous zone of permafrost of Western Siberia by the high resolution satellite images. *Atmospheric and oceanic optics*, 2016, vol. 29, no. 07, pp. 592–597. In Rus.
22. Downing J.A., Prairie Y.T. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnol. Oceanogr.*, 2006, vol. 51, pp. 2388–2397.
23. Verpoorter C., Kutser T., Seekel D.A., Tranvik L.J. A global inventory of lakes based on high resolution satellite imagery. *Geophys. Res. Lett.*, 2014, vol. 41, pp. 1–7.

Received: 23 July 2016.

Information about the authors

Yury M. Polishchuk, Dr. Sc., professor, chief research scientist, Ugra Research Institute of Information Technology; chief research scientist, Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS.

Alexander N. Bogdanov, principle engineer, Ugra Research Institute of Information Technology.

Ildar N. Muratov, principle engineer, Ugra Research Institute of Information Technology.

Vladimir Y. Polishchuk, Cand. Sc., Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems; assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.