

Методические вопросы построения обобщенных гистограмм распределения площадей озер в зоне мерзлоты на основе космических снимков среднего и высокого разрешения

Ю.М. Полищук^{1,2}, А.Н. Богданов¹, И.Н. Муратов¹

¹Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий
Ханты-Мансийск, 628011, Россия,

²Институт химии нефти СО РАН, Томск, 634021, Россия
E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Статья посвящена вопросам построения обобщенных гистограмм распределения площадей термокарстовых озер, учитывающих всю совокупность озер в зонах мерзлоты – от самых малых до больших размеров. Предлагаемый подход к построению обобщенной гистограммы основан на объединении двух исходных гистограмм, полученных по снимкам высокого (Канопус-В, БКА и Alos) и среднего (Landsat-8) пространственного разрешения и отражающих распределения малых и больших озер соответственно. Дистанционные исследования проведены на территории криолитозоны Западной Сибири. Для определения числа и площадей озер больших размеров использована мозаика снимков Landsat-8 за 2013–2014 гг. Исследования свойств малых озер проведены на 66 тестовых участках, расположенных достаточно равномерно на той же территории. Рассмотрены методические вопросы проведения указанного объединения гистограмм распределения озер по площадям, полученным по снимкам разного разрешения на примере территории криолитозоны Западной Сибири. В статье представлен график, иллюстрирующий процедуру «сшивания» двух исходных гистограмм с целью построения обобщенного распределения площадей озер. Обобщенная гистограмма распределения озер по площадям представлена в виде графика в двойном логарифмическом масштабе, обеспечивающем ее компактное представление в очень широком диапазоне изменения размеров озер.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, геоинформационные системы, космические снимки, гистограмма распределения озер по площадям

Одобрена к печати: 21.11.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-224-232

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. Ввиду труднодоступности и высокой степени заболоченности территории в зонах мерзлоты 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 (Викторов и др., 2015; Karlsson et al., 2014). В большинстве этих исследований использовались космические снимки среднего 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 (Pokrovsky et al., 2011), 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; Polishchuk et al., 2015), использовались снимки сверхвысокого разрешения (менее 1 м) для исследования распределений термо-

карстовых озер в зоне мерзлоты Сибири. Однако эти снимки из-за малой полосы охвата территории обеспечивают сравнительно небольшое покрытие исследуемой территории, что не позволяет получать гистограммы распределения озер по площадям, включающие данные о площади водоемов средних и больших размеров, в которых накапливаются также значительные объемы метана и углекислого газа.

В связи с изложенным важное значение приобретает задача построения гистограмм распределения площадей озер по результатам дистанционных исследований, в которых учитывались бы практически все озера исследуемой территории в зоне мерзлоты в широком диапазоне их размеров – от нескольких метров до десятков километров. Такие гистограммы распределения площадей озер могут быть построены только на основе интеграции данных о площадях водоемов, получаемых из спутниковых снимков как высокого (сверх-высокого), так и среднего разрешений. Однако вопросы объединения данных о площадях озер, получаемых из снимков различного пространственного разрешения для построения интегрированных гистограмм распределения площадей озер с расширенным диапазоном размеров водоемов в настоящее время не исследованы.

В связи с изложенным целью настоящей работы явилась разработка методических вопросов интеграции данных, полученных с помощью космических снимков среднего и высокого разрешения, для построения обобщенных гистограмм распределения озер по площадям на примере территории криолитозоны Западной Сибири.

Данные и методы исследования

Согласно (Викторов и др., 2015) образование термокарстовых озер происходит под воздействием нескольких факторов, главными из которых являются наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород и равнинный характер территории. В (Кравцова, 2009) 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 Landsat-8 среднего разрешения (30 м) и 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 направлена на получение данных о численности и площадях озер для построения двух исходных гистограмм распределения озер по площадям, первая из которых представляет преимущественно малые озера, а вторая – большие озера.

В связи с необходимостью получения обобщенного распределения площадей озер в чрезвычайно широком диапазоне изменения их размеров (от десятков м² до десятков тысяч га) на основе интеграции (объединения) двух исходных гистограмм распределения озер 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 20 000 га. Заметим, что определение ширины указанных интервалов в логарифмическом масштабе (50, 100, 300, 500 м² и т.д.) позволяет представить обе исходные гистограммы распределения озер достаточно компактно в очень широком диапазоне изменений площадей озер.

Для получения исходной гистограммы распределения озер сравнительно больших размеров с целью наиболее полного учета озер в криолитозоне Западной Сибири была составлена мозаика снимков Landsat-8 за период 2013–2014 гг., с использованием которой были определены суммарная площадь озер и их общая численность. Минимальный размер выделяемых на снимках озер был выбран равным 0,5 га, что соответствует размеру площади приблизительно 6 пикселей. В результате обработки мозаики космических снимков Landsat-8 средствами ArcGIS 10.3 были получены векторные слои термокарстовых озер на территории криолитозоны Западной Сибири, позволившие определить число и площади озер крупнее 0,5 га. Суммарное количество выявленных озер на исследуемой территории в период 2013–2014 гг. составило 727,7 тыс. при их общей площади около 6 млн. га. Полученные данные о числе и площадях озер на исследуемой территории, распределенные по указанным выше частичным интервалам площадей в логарифмическом масштабе, приведены в *табл. 1* в виде зависимости числа озер от площади (т.е. по частичным интервалам площадей).

Таблица 1. Распределение озер по интервалам их площадей по снимкам Landsat-8

<i>Частичные интервалы площадей озер, га</i>	<i>Количество озер</i>
0,5–1	240 582
1–2	171 309
2–5	152 240
5–10	72 091
10–20	43 443
20–50	30 081
50–100	10 354
100–200	4 636
200–500	2 227
500–1000	511
1000–2000	169
2000–5000	57
5000–10000	19
10000–20000	9
Итого:	727 728

При получении другой исходной гистограммы, представляющей озера преимущественно малых размеров, основанной на снимках высокого разрешения, использовался метод тестовых (ключевых) участков (ТУ). 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. 2*.

Таблица 2. Характеристика тестовых участков и космических снимков ВР

<i>Зона мерзлоты</i>	<i>Съемочный аппарат</i>	<i>Количество ТУ</i>	<i>Средняя площадь ТУ</i>	<i>Период съемки</i>
Островная	Канопус-В	29	2845	2013–2014
	ALOS	3	3355	2007–2008
Прерывистая	Канопус-В	18	3125	2013–2014
Сплошная	Канопус-В	11	3210	2014–2015
	ALOS	5	2910	2008

Выбранные тестовые участки, как видно из *табл. 2*, имеют приблизительно одинаковые размеры. Суммарная площадь всех ТУ составляет около 0,2 млн. га, что соответствует 0,002% от всей площади территории 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 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?

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 (Викторов и др., 2015). 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 работе (Полищук, Богданов, 2015), 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 автоматического определения границ зон АТ выполняется, согласно (Полищук, Богданов, 2015), с использованием инструмента пространственного анализа Aggregate Polygons 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 (Полищук, Богданов, 2015): *ошибки занижения* общей площади автоматически определяемых границ зон АТ из-за пропуска малых озер при выборе слишком малого расстояния между озерами d (рис. 1) 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. 1. Определение границ зон активного термокарста путем агрегирования озер

Путем имитационных экспериментов в (Полищук, Богданов, 2015), проведенных на различных участках исследуемой территории по снимкам Landsat-8 с использованием снимков ВР, было определено оптимальное расстояние d , минимизирующее указанные ошибки. 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_o), полученной на тестовых участках по снимкам ВР, расчетная величина суммарной площади озер (S_p) на общей территории всех зон АТ может быть определена в виде:

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

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

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

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

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 аналогично табл. 2, но уже по интервалам площадей в диапазоне от 50 м² до 20 га

будет использовано далее при формировании второй исходной гистограммы распределения озер (преимущественно малых размеров) на основе снимков ВР.

Построение обобщенной гистограммы распределения площадей озер

На основе данных о числе и площадях озер на исследуемой территории (табл. 2), полученных по снимкам СР, построена гистограмма распределения озер по площадям, представленная на рис. 2 черными столбиками, которые показывают число озер в частичных интервалах площадей (в диапазоне от 0,5 до 20000 га) в соответствии с табл. 1.

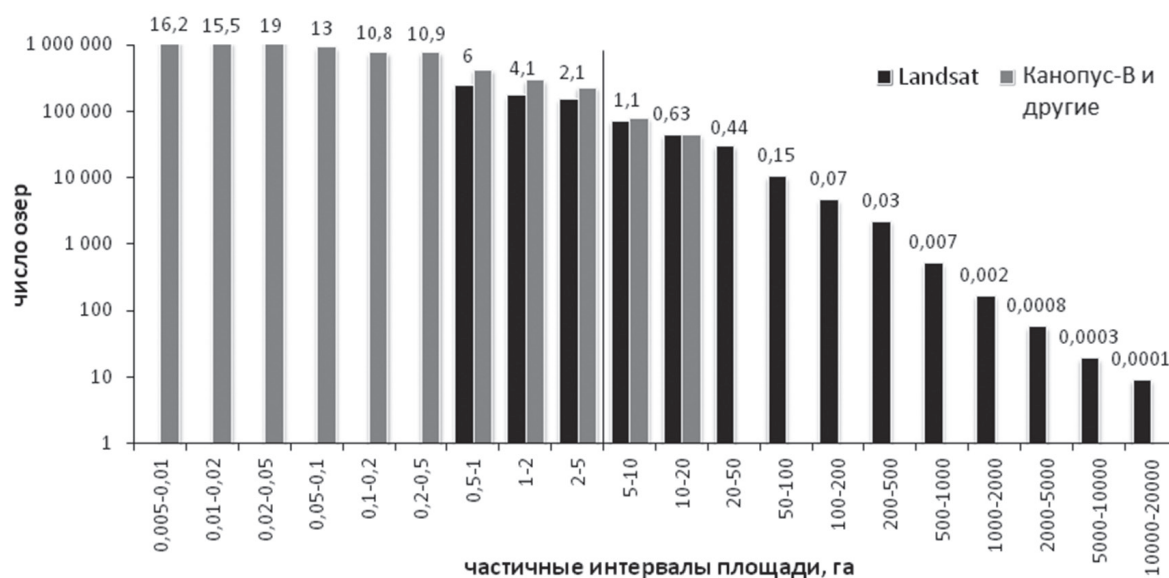


Рис. 2. Совмещенный график исходных гистограмм с их перекрытием в диапазоне площадей озер 0,5–20 га

Перейдем к получению другой исходной гистограммы распределения озер, полученной 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: $N_s = 60350$ и $S_s = 57997$ га. Учитывая, что в нашем случае коэффициент $t = 121$, путем экстраполяции величин N_s и S_s 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, найденное

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. 2* в диапазоне изменения площадей от 0,005 до 20 га.

Представленные на *рис. 2* исходные гистограммы распределения озер по площадям имеют область перекрытия (наложения) шириной в 5 интервалов, расположенных в диапазоне площадей 0,5–20 га. Согласно (Брыксина, Полищук, 2013) практически приемлемая погрешность дистанционного измерения площади озер по снимкам СР достигается при размерах озер 2 га и более. Поэтому обобщенная гистограмма может быть получена на основе «сшивания» двух исходных гистограмм в точке, соответствующей значению площади 2 га и отмеченной на *рис. 2* вертикальным отрезком прямой линии. Полученная в результате такого «сшивания» обобщенная гистограмма будет определена в широком диапазоне изменения площадей озер от 50 м² до 20000 га, при этом в интервалах площадей менее 2 га используются данные по снимкам ВР, а в интервалах более 2 га – данные по снимкам СР. Отметим, что на *рис. 2* цифры над столбиками обобщенной гистограммы обозначают величину относительного числа озер в каждом частичном интервале гистограммы, определяемую как $k_i = n_i / N$, где n_i – число озер в i -ом частичном интервале; N – суммарное число озер во всех интервалах обобщенной гистограммы в широком диапазоне изменения площадей озер от 50 м² до 20000 га.

Описанная выше обобщенная гистограмма распределения озер, согласно (Афанасьев, Шмакова, 2009), представляет собой гистограмму относительных частот. Переходя в каждом i -ом частичном интервале гистограммы к нормированным частотам $w_i = k_i/h_i$, где h_i – ширина i -го интервала, получим в терминологии (Афанасьев, Шмакова, 2009) нормированную гистограмму обобщенного распределения площадей озер в криолитозоне Западной Сибири, приведенную на *рис. 3*.

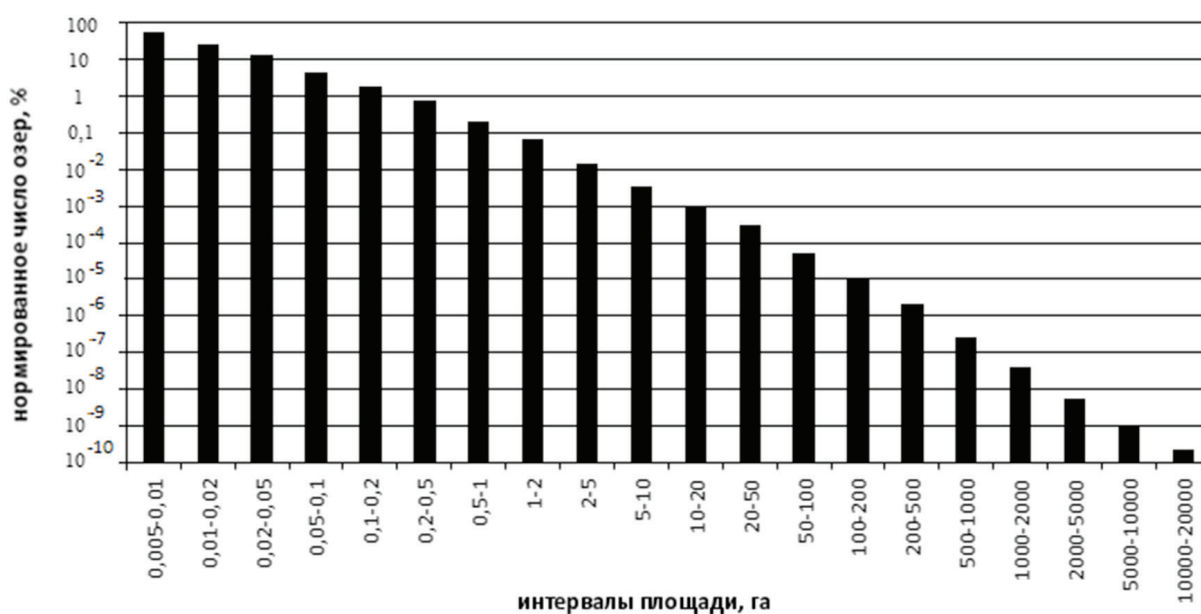


Рис. 3. Обобщенная гистограмма распределения площадей озер в криолитозоне Западной Сибири

Заключение

В статье рассмотрены вопросы совместного использования космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения для исследования распределения площадей термокарстовых озер в широком диапазоне изменений размеров озер на территориях многолетней мерзлоты. Для проведения исследований в работе использованы спутниковые снимки среднего (Landsat-8) и высокого (Канопус-В, БКА, Alos) пространственного разрешения, позволившие с использованием средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3 определить площади большого числа озер (до нескольких миллионов) в островной, прерывистой и сплошной криолитозонах Западной Сибири. Были построены гистограммы распределения озер больших размеров на основе мозаики снимков Landsat-8 и озер сравнительно малых размеров с использованием снимков высокого разрешения. С использованием разработанной в статье методики была построена обобщенная гистограмма распределения по площадям, изменяющимся в широком диапазоне от 50 м² до 20000 га.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по проекту № 15-45-00075.

Литература

1. *Брыксина Н.А., Полищук Ю.М.* Исследование точности дистанционного измерения площадей озер с использованием космических снимков // Геоинформатика. 2013. № 1. С. 64–68.
2. *Викторов А.С., Капралова 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.
3. *Кравцова В.И.* Распространение термокарстовых озер в России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. География. 2009. № 3. С. 33–42.
4. *Афанасьев К.Е., Шмакова Л.Е.* Математика и информатика. Часть II. Математика. Полигон и гистограмма [Электронный ресурс]: электронный учебно-методический комплекс. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2009. URL: <http://umk.portal.kemsu.ru/uch-mathematics/papers/posobie/t4-3.htm> (дата обращения: 27.06.2015).
5. *Полищук Ю.М., Богданов А.Н.* Зоны активного термокарста на территории многолетней мерзлоты и их выявление по космическим снимкам // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 12. С. 104–114.
6. *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.
7. *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.
8. *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. Vol. 8. P. 565–583.
9. *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. P. 999–106.

Methodological issues of construction of generalized histograms of lake size distribution in the permafrost based on satellite images of middle and high resolution

Yu.M. Polishchuk^{1,2}, A.N. Bogdanov¹, I.N. Muratov¹

¹Yugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk 628011, Russia

²Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, Tomsk 634050, Russia

E-mail: yupolishchuk@gmail.com

The paper is devoted to the construction of generalized histograms of thermokarst lakes size distribution taking into account the totality of lakes in permafrost areas, from the very small to large sizes. The proposed approach to the construction of a generalized histogram is based on a combination of the two original histograms obtained from images of high (Kanopus-V, BKA, Alos) and middle (Landsat-8) spatial resolution and reflecting the distribution of small and large lakes, respectively. The remote sensing research was conducted on the territory of the permafrost zone of Western Siberia. To determine the number and area of large lakes, a mosaic of Landsat-8 images of 2013–2014 was used. Studies of small lakes properties were held at 66 test sites distributed quite evenly over the same territory. Methodical issues of the integration of histograms of lakes size distribution obtained from images of different resolutions are described by the example of the permafrost territory of Western Siberia. In the article, a graph illustrating the procedure of integration of the two original histograms for the purpose of constructing a generalized lakes size distribution histogram is represented. The generalized histogram of lakes size distribution is represented as a graph in double logarithmic scale ensuring its compact representation in a very wide range of sizes of the lakes.

Keywords: permafrost, geoinformation systems, satellite images, histogram of lakes size distribution

Accepted: 21.11.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-224-232

References

1. Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M., Issledovanie tochnosti distantsionnogo izmereniya ploshchadei ozer s ispol'zovaniem kosmicheskikh snimkov (Research of remote measurement accuracy of lake areas using space images), *Geoinformatika*, 2013, No. 1, pp. 64–68.
2. Viktorov A.S., Kapranova V.N., Trapeznikova O.N., Matematicheskaya model' morfologicheskoy struktury ozerno-termokarstovykh ravnin v izmenyayushchikhsya klimaticheskikh usloviyakh (Mathematical model of the lacustrine-thermokarst plain morphostructure under the changing climatic conditions), *Kriosfera Zemli*, 2015, Vol. 19, No. 2, pp. 26–34.
3. Kravtsova V.I., Rasprostraneniye termokarstovykh ozer v Rossii (Dissemination of thermokarst lakes in Russia), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya*, 2009, No. 3, pp. 33–42.
4. Afanas'ev K.E., Shmakova L.E., *Matematika i informatika. Chast' II. Matematika, Poligon i gistogramma* (Mathematics and informatics. Part II. Mathematics. Polygon and histogram), Kemerovo: Kemerovskii gosudarstvennyi universitet, 2009, available at: <http://umk.portal.kemsu.ru/uch-mathematics/papers/posobie/t4-3.htm> (June 27, 2015).
5. Polishchuk Yu.M., Bogdanov A.N., Zony aktivnogo termokarsta na territorii mnogoletnei merzloty i ikh vyavlenie po kosmicheskim snimkam (Active thermokarst zones on permafrost territory and their detecting on space images), *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* (Bulletin of Tomsk Polytechnic University), 2015, Vol. 326, No. 12, pp. 104–114.
6. 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, pp. 551–556.
7. 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.
8. 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, Vol. 8, pp. 565–583.
9. 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. 999–106.