

Интеграция космических снимков сверхвысокого и среднего разрешения для построения гистограмм распределения площадей термокарстовых озёр в расширенном диапазоне их размеров

Ю. М. Полищук^{1,2}, А. Н. Богданов¹, Н. А. Брыксина³,
И. Н. Муратов¹, В. Ю. Полищук^{4,5}

¹ Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, 628011, Россия
E-mail: yupolishchuk@gmail.com

² Институт химии нефти СО РАН, Томск, 634055, Россия

³ Балтийский федеральный университет им. И. Канта
Калининград, 236041, Россия
E-mail: bryksina83@gmail.com

⁴ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, 634021, Россия

⁵ Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия
E-mail: liquid_metal@mail.ru

Статья посвящена вопросам использования снимков сверхвысокого разрешения в комбинации со снимками среднего разрешения для построения гистограммы распределения площадей озёр по эмпирическим гистограммам, представленных в очень широком диапазоне площадей, включая малые и очень малые озёра. Рассмотрены методические вопросы синтеза двух гистограмм распределения площадей озёр, одна из которых получается по снимкам сверхвысокого разрешения на ограниченной совокупности тестовых участков, другая — по мозаике снимков среднего разрешения территории исследований. Для построения гистограмм использованы снимки среднего разрешения спутника Landsat-8 и сверхвысокого разрешения КА «Ресурс-П», QuickBird и GeoEye-1, отражающие распределения малых и очень малых озёр. Дистанционные исследования с использованием снимков сверхвысокого разрешения проведены на 37 тестовых участках, расположенных достаточно равномерно на территории криолиотозоны Западной Сибири. Синтезирована единая гистограмма распределения озёр по площадям в очень широком диапазоне размеров от 5 м² до 20000 га.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, геоинформационные системы, космические снимки, гистограммы распределения озёр по площадям, логнормальный закон распределения

Одобрена к печати: 04.04.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-9-17

Введение

Озёра и другие поверхностные водоёмы являются одними из важных источников эмиссии парниковых газов в атмосферу. В задачах оценки и прогноза объёмов накопления метана в озёрах в планетарном масштабе обычно используют степенной закон распределения озёр по площадям, основанный на результатах анализа данных глобальной инвентаризации водоёмов с использованием в основном картографических материалов (Downing, Prairie, 2006; Lehner, Doll, 2004).

Потепление климата последних десятилетий привело к значительному ускорению термокарстовых процессов в зоне многолетней мерзлоты, вызывающему рост концентрации метана в термокарстовых озёрах. Ввиду труднодоступности и высокой степени заболоченности территории получение данных об изменении численности и распределении площадей термокарстовых озёр в зоне мерзлоты невозможно без применения методов дистанционного зондирования поверхности Земли. В последнее время проведены дистанционные исследования распределения площадей термокарстовых озёр в Сибири и в других северных регионах,

результаты которых (Викторов и др., 2015; Полищук и др., 2015а, б) подтверждают степенной вид закона распределения площадей.

В большинстве этих исследований использовались космические снимки среднего разрешения Landsat (30 м), на которых не обнаруживаются озёра малых размеров. Поэтому полученные по ним эмпирические распределения площадей не учитывают вклад очень малых термокарстовых озёр с повышенной концентрацией метана, значительно превышающей его концентрацию в озёрах больших размеров (Holgerson, Raymond, 2016). В связи с этим для учёта малых озёр следует применять снимки высокого и сверхвысокого разрешения. Однако эти снимки из-за малой полосы охвата, обеспечивающей лишь сравнительно небольшое покрытие исследуемой территории, не позволяют получать гистограммы распределения озёр по площадям, которые учитывали бы водоёмы больших размеров.

В связи с изложенным важное значение приобретает задача построения гистограмм распределения площадей озёр по результатам дистанционных исследований, в которых учитывались бы практически все водоёмы исследуемой территории в широком диапазоне их размеров — от нескольких метров до десятков километров. Такие гистограммы распределения площадей озёр могут быть построены только на основе интеграции данных о площадях водоёмов, получаемых из спутниковых снимков не только среднего, но и высокого и сверхвысокого разрешений. Элементы методологии объединения (интеграции) данных по снимкам высокого и среднего пространственного разрешения, направленной на построение интегрированной гистограммы распределения площадей озёр, рассмотрены в работе (Полищук и др., 2016а). Однако при использовании спутниковых снимков сверхвысокого разрешения эта методология приводит к завышенным значениям числа озёр в интервалах гистограммы, относящихся к малым озёрам.

Целью настоящей работы стала разработка методических вопросов интеграции данных, получаемых из снимков сверхвысокого и среднего разрешения, для построения единой гистограммы распределения площадей термокарстовых озёр как малых, так и больших размеров, пригодной для определения вида теоретического закона распределения озёр в широком диапазоне их размеров.

Данные и методы исследования

Информационной основой исследования законов распределения термокарстовых озёр по размерам являются данные дистанционного измерения площадей водоёмов по космическим снимкам исследуемой территории. Согласно работе (Викторов, 2006), образование термокарстовых озёр происходит под воздействием нескольких факторов, главными из которых являются наличие высокольдистых многолетнемёрзлых пород и равнинный характер территории. В работе (Кравцова, Быстрова, 2009) на основе геоморфологического и климатического анализа вся криолитозона Западной Сибири отнесена к числу районов с повсеместным распространением термокарстовых озёр. Поэтому озёра, распределение площадей которых исследуется в настоящей работе дистанционным методом, рассматриваются как термокарстовые. Такие озёра характеризуются чрезвычайно широким интервалом изменений их размеров — от единиц квадратных метров до сотен тысяч гектаров. Для удобства рассмотрения в дальнейшем будем условно разделять озёра по размерам на три группы: большие (площадь более 2 га), малые (от 500 м² до 2 га) и сверхмалые (менее 500 м²). Целесообразность выделения отдельной группы сверхмалых термокарстовых озёр обусловлена тем, что концентрация метана в них, согласно (Полищук и др., 2015б; Holgerson, Raymond, 2016; Pokrovsky et al., 2011), более чем на порядок превышает его концентрацию в озёрах с размерами свыше 500 м².

Исследования распределения озёр в настоящей работе проводились в криолитозоне Западной Сибири с использованием космических снимков сверхвысокого разрешения КА «Ресурс-П» (0,7 м), QuickBird и GeoEye-1 (0,6 м) в сочетании со снимками Landsat-8 среднего разрешения (30 м). Все снимки выбирались в достаточно короткий период летнего сезона (конец июня — август) для минимизации влияния сезонных колебаний уровня воды в озёрах. В этот период полностью исчезает ледовый покров на озёрах, мешающий их выделению

при дешифрировании снимков. Обработка космических снимков, проведённая с использованием стандартных средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3, была направлена на получение данных о численности и площадях озёр с существенно различающимися размерами с целью построения гистограммы распределения озёр в очень широком диапазоне их размеров.

Насколько нам известно, в настоящее время вопросы построения единой гистограммы распределения площадей озёр в чрезвычайно широком диапазоне изменения их размеров (от единиц квадратных метров до десятков тысяч гектар) разработаны недостаточно. Рассмотренная в работе (Полищук и др., 2016а) процедура построения такой гистограммы на основе синтеза двух исходных гистограмм распределения озёр, получаемых отдельно по снимкам высокого и среднего разрешения, не адаптирована к использованию снимков сверхвысокого разрешения. В связи с необходимостью построения единой гистограммы распределения площадей озёр на основе синтеза двух исходных гистограмм распределения озёр в настоящей работе предлагается для построения исходных и синтезированной гистограмм выбирать частичные интервалы с неравномерным шагом (по логарифмическому закону), а именно: 5–10 м², 10–20 м², 20–50 м², 50–100 м² и т. д. до 20 000 га. Заметим, что установление ширины указанных интервалов в логарифмическом масштабе (5, 10, 30, 50, 100 м² и т. д.) позволяет представить данные о распределении озёр по интервалам их размеров достаточно компактно в очень широком диапазоне изменений площадей озёр. Всего в работе было выбрано 23 частичных интервала.

Для построения синтезированной гистограммы распределения озёр по снимкам сверхвысокого (СВР) и среднего (СР) разрешения и определения на её основе вида теоретического закона распределения площадей озёр предлагается методика, включающая следующий перечень основных этапов:

- Этап 1. Построение гистограммы по СР-снимкам с целью учёта озёр преимущественно больших размеров.
- Этап 2. Построение гистограммы по СВР-снимкам с целью учёта озёр малых и сверхмалых размеров с использованием процедуры экстраполяции данных о суммарных площадях и числе озёр, полученных на ограниченной совокупности тестовых участков, на всю территорию исследований.
- Этап 3. Объединение (синтез) двух исходных гистограмм, полученных на предыдущих этапах, в единую (синтезированную) гистограмму распределения площадей озёр, учитывающую озёра в широком диапазоне их размеров — от сверхмалых до больших.

Построение единой гистограммы распределения площадей озёр в широком диапазоне их размеров

На 1-м этапе для получения первой исходной гистограммы распределения озёр сравнительно больших размеров с целью наиболее полного учёта водоёмов в криолитозоне Западной Сибири была составлена мозаика СР-снимков Landsat-8 за период 2013–2014 гг., с использованием которой были определены численность и суммарная площадь озёр. Минимальный размер выделяемых на снимках водоёмов был выбран равным 0,5 га, что соответствует размеру площади приблизительно 6 пикселей и позволяет достаточно достоверно выделять озёра на снимке. В результате обработки мозаики космических снимков Landsat-8 средствами ArcGIS 10.3 были получены векторные слои термокарстовых озёр на территории криолитозоны Западной Сибири, позволившие определить число и площади всех водоёмов крупнее 0,5 га. Суммарное количество выявленных озёр на исследуемой территории в период 2013–2014 гг. составило 727 700 при их общей площади около 6 млн га. Полученные данные о числе и площадях озёр по снимкам СР на исследуемой территории, распределённые по указанным выше частичным интервалам площадей в логарифмическом масштабе, представлены в виде первой исходной гистограммы распределения площадей озёр с размерами от 0,5 до 20 000 га на *рис. 1* (серые столбики, см. с. 12). Заметим, что данные об озёрах

в указанном интервале размеров, на основе которых построена показанная серыми столбиками (см. рис. 1) гистограмма распределения больших озёр, приведены в табличном виде в работе (Полищук и др., 2016а) как зависимость числа озёр от площади (т.е. по частичным интервалам площадей).



Рис. 1. Иллюстрация совмещения графиков двух исходных гистограмм

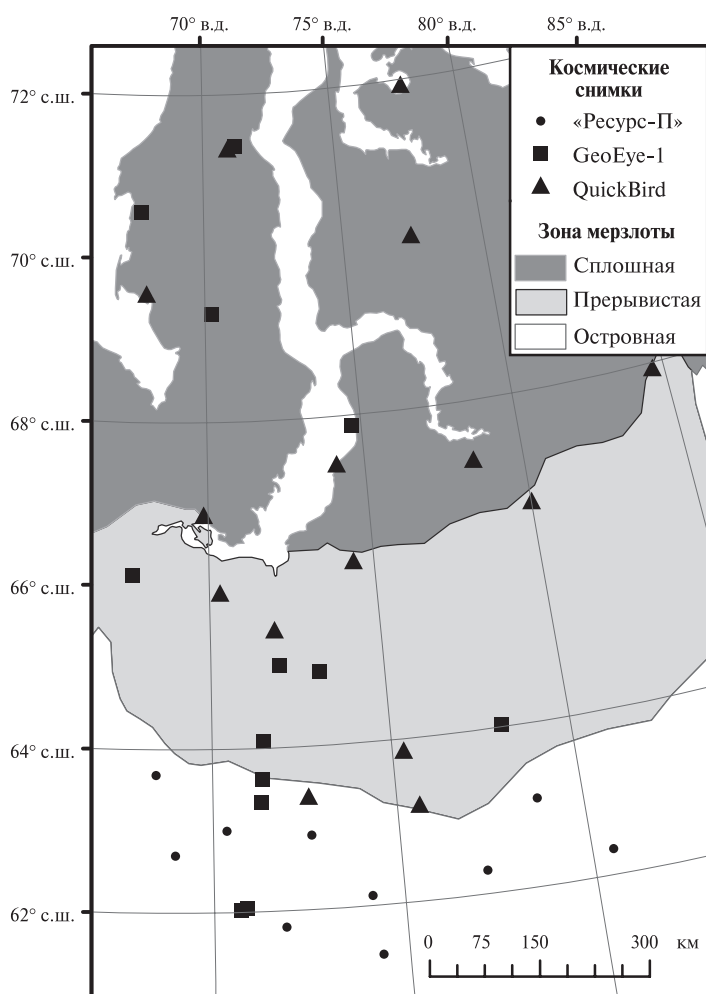


Рис. 2. Схема расположения тестовых участков

На 2-м этапе предусмотрено получение по СВР-снимкам другой исходной гистограммы, представляющей озёра преимущественно малых и сверхмалых размеров. На этом этапе для получения данных дистанционного исследования использовался метод тестовых (ключевых) участков (ТУ). Обработка СВР-снимков КА «Ресурс-П», QuickBird и GeoEye-1 проводилась средствами ArcGIS 10.3 на сценах в границах 37 тестовых участков, достаточно равномерно распределённых по территориям островной, прерывистой и сплошной криолитозон Западной Сибири. Схема размещения тестовых участков на территории Западной Сибири и краткая характеристика как этих участков, так и использованных в работе СВР-снимков, дана на *рис. 2* (см. с. 12) и в *табл. 1*. Выбранные тестовые участки имели приблизительно одинаковые размеры. Суммарная площадь всех ТУ составляла около 0,2 млн га, что соответствует 0,002 % от всей площади исследованной территории криолитозоны Западной Сибири.

Таблица 1. Характеристика тестовых участков и космических снимков сверхвысокого разрешения

Зона мерзлоты	Съёмочный аппарат	Количество ТУ	Средняя площадь ТУ	Период съёмки (гг.)
Островная	«Ресурс-П»	10	372	2015–2016
	GeoEye-1	4	369	2012–2013
	QuickBird	1	353	2007–2009
Прерывистая	GeoEye-1	5	382	2010–2012
	QuickBird	7	351	2003–2011
Сплошная	GeoEye-1	4	293	2003–2011
	QuickBird	8	353	2003–2006

Тестовые участки выбирались нами, как принято в подобных исследованиях, в местах скопления термокарстовых озёр, т. е. в зонах, где существуют условия для формирования очагов термокарстовых процессов (Викторов, 2006), называемых в работе (Полищук, Богданов, 2015) для краткости зонами активного термокарста (ЗАТ). Поэтому для выбора тестовых участков применялась карта расположения зон активного термокарста на территории криолитозоны Западной Сибири, построенная по снимкам Landsat-8 с использованием ArcGIS 10.3 в соответствии с методикой формирования картографического слоя границ ЗАТ (Полищук, Богданов, 2015).

При построении на 2-м этапе следующей исходной гистограммы распределения площадей малых и сверхмалых озёр, обобщённой на всю территорию исследований в Западной Сибири, возникает важный методический вопрос: как распространить данные о численности и площадях озёр, полученные на отдельных тестовых участках, на всю исследуемую территорию? Одним из вариантов ответа на этот вопрос может рассматриваться разработанный в (Полищук и др., 2016а) способ построения обобщённой гистограммы распределения площадей озёр на основе данных о числе и площадях водоёмов на тестовых участках с использованием ВР-снимков спутника «Канопус-В» и БКА (Белорусский космический аппарат). Однако использование данного способа применительно к СВР-снимкам приводит к завышению значений числа и площадей озёр в интервалах обобщённой гистограммы. Поэтому в настоящей работе предлагается другой способ экстраполяции данных с СВР-снимков на всю территорию исследований.

Ниже кратко изложим основную идею, положенную в основу этого нового способа. Будем рассматривать значения суммарных чисел озёр и их общих площадей в интервалах гистограммы, определяемые по мозаике СР-снимков Landsat-8, как истинные. Представляется логичным потребовать, чтобы в интервалах в области перекрытия двух исходных гистограмм к этим значениям были бы близки (в среднем) экстраполируемые (на всю территорию) значения суммарного числа озёр и их общей площади в совпадающих интервалах гистограммы, которые определяются на отдельных тестовых участках по СВР-снимкам. Получение

экстраполированных (расчётных) значений числа и площадей озёр в интервалах обобщённой гистограммы осуществляется умножением измеренных по СВР-снимкам значений суммарного числа озёр и их общей площади на всех тестовых участках на коэффициент экстраполяции, определяемый в виде:

$$K = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{N_{CPi}}{N_{эi}},$$

где $N_{эi}$ и N_{CPi} — число экспериментально определённых озёр по снимкам сверхвысокого и среднего разрешения соответственно в каждом i -м интервале в области перекрытия гистограмм; i — номер интервала в области перекрытия; m — число перекрывающихся интервалов. Заметим, что $N_{эi}$ определяется по всей совокупности тестовых участков, а N_{CPi} — по всей территории исследования.

В нашем случае $m = 5$ и коэффициент экстраполяции $K = 839$. Результаты экстраполяции экспериментальных данных о суммарной площади и числе озёр, полученных на тестовых участках по снимкам сверхвысокого разрешения, на всю территорию в виде расчётных величин суммарного числа (N_{pj}) и суммарной площади озёр (S_{pj}) в каждом j -м интервале гистограммы могут быть определены по формулам:

$$S_{pj} = S_{эj} \cdot K,$$

$$N_{pj} = N_{эj} \cdot K,$$

где $S_{эj}$ и $N_{эj}$ — экспериментально определённые (по космическим снимкам сверхвысокого разрешения) суммарная площадь и общее число озёр на всех тестовых участках соответственно; j — номер интервала гистограммы на *рис. 1*.

Полученные таким образом расчётные величины суммарного числа N_{pj} и суммарной площади озёр S_{pj} в каждом j -м интервале будут относиться ко всей территории криолитозоны Западной Сибири, что позволяет сформировать вторую исходную гистограмму распределения озёр (преимущественно малых и сверхмалых размеров) по СВР-снимкам как результат выполнения второго этапа. Эта гистограмма представлена в графическом виде чёрными столбиками на *рис 1* в диапазоне площадей озёр от 0,0005 до 20 га.

На 3-м этапе на основе объединения (синтеза) двух исходных гистограмм, полученных на предыдущих этапах, создаётся единая (синтезированная) гистограмма распределения площадей озёр в широком диапазоне их размеров. На *рис. 1* исходные гистограммы имеют область перекрытия (наложения интервалов) шириной в пять интервалов в диапазоне площадей 0,5–20 га. Согласно (Брыксина, Полищук, 2013), практически приемлемая погрешность дистанционного измерения площади озёр по СР-снимкам достигается при размерах 2 га и более. Поэтому синтезированная гистограмма распределения площадей озёр может быть получена на основе «сшивания» двух исходных гистограмм в точке, соответствующей значению площади 2 га и отмеченной на графике вертикальным отрезком прямой линии, показанной серым цветом. Полученная в результате такого «сшивания» на 3-м этапе синтезированная гистограмма представляет распределение озёр в широком диапазоне изменения площадей от 5 м² до 20 000 га, при этом в интервалах площадей гистограммы менее 2 га используются данные по снимкам СВР, а в интервалах более 2 га — данные по СР-снимкам. В табличном виде эта гистограмма представлена в *табл. 2*, где также приведены данные о суммарной (общей) величине площади озёр в каждом интервале площадей.

Таблица 2. Распределение числа озёр по интервалам площадей

Интервал площадей, га	Ширина интервала, м ²	Число озёр	Общая площадь озёр, га
0,0005–0,001	5	1 722 467	1173,509
0,001–0,002	10	1 651 152	2314,13
0,002–0,005	30	1 433 851	4467,172

Интервал площадей, га	Ширина интервала, м ²	Число озёр	Общая площадь озёр, га
0,005–0,01	50	926 256	6696,311
0,01–0,02	100	901 086	13 078,75
0,02–0,05	300	1 128 455	36 199,33
0,05–0,1	500	728 252	51 961,54
0,1–0,2	10 ³	641 835	90 813,86
0,2–0,5	3·10 ³	692 175	223 305,6
0,5–1	5·10 ³	385 940	269 233,7
1–2	10 ⁴	267 641	372 496,1
2–5	3·10 ⁴	152 240	481 650,6
5–10	5·10 ⁴	72 091	507 487,8
10–20	10 ⁵	43 443	609 712,6
20–50	3·10 ⁵	30 081	926 364,3
50–100	5·10 ⁵	10 354	717 571,4
100–200	10 ⁶	4636	638 174,6
200–500	3·10 ⁶	2227	666 245,2
500–1000	5·10 ⁶	511	352 498,5
1000–2000	10 ⁷	169	233 803,1
2000–5000	3·10 ⁷	57	162 679,6
5000–10 000	5·10 ⁷	19	125 671,2
10 000–20 000	10 ⁸	9	123 066,3

Заключение

В статье рассмотрены вопросы совместного использования космических снимков сверхвысокого и среднего пространственного разрешения для исследования распределения площадей термокарстовых озёр в широком диапазоне изменений их размеров на территориях многолетней мерзлоты. Для проведения исследований в работе использованы спутниковые снимки КА «Ресурс-П», QuickBird и GeoEye, позволившие с помощью средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3 определить число и площади термокарстовых озёр на 37 тестовых участках. Были построены гистограммы распределения площадей озёр по снимкам сверхвысокого и среднего разрешения, на основе которых создана единая (синтезированная) гистограмма распределения озёр. Рассмотренная в статье методология построения гистограмм распределения озёр на основе интеграции данных со спутниковых снимков различного разрешения позволила получить единую гистограмму распределения площадей озёр в очень широком интервале их размеров. Важнейшим достоинством и новизной полученной гистограммы является учёт малых и сверхмалых озёр в интервале площадей от 5 м² до 2 га, что позволяет изучить особенности распределения озёр по площадям в зоне мерзлоты Западной Сибири.

Литература

1. Брыксина Н. А., Полищук Ю. М. Исследование точности дистанционного измерения площадей озёр с использованием космических снимков // Геоинформатика. 2013. № 1. С. 64–68.
2. Викторов А. С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
3. 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.
4. Кравцова В. И., Быстрова А. Г. Изменение размеров термокарстовых озёр в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 2. С. 16–26.

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. *Полищук Ю. М., Брыксина Н. А., Полищук В. Ю.* (2015а) Дистанционный анализ изменения числа и распределения по размерам малых термокарстовых озер криолитозоны Западной Сибири // *Исследование Земли из космоса.* 2015. № 3. С. 34–42.
7. *Полищук Ю. М., Полищук В. Ю., Брыксина Н. А., Покровский О. С., Кирпотин С. Н., Широкова Л. С.* (2015б) Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озерах в зоне мерзлоты Западной Сибири // *Известия Томского политехнического университета.* 2015. Т. 326. № 2. С. 127–135.
8. *Полищук Ю. М., Богданов А. Н., Муратов И. Н.* (2016а) Методические вопросы построения обобщенных гистограмм распределения площадей озер в зоне мерзлоты на основе космических снимков среднего и высокого разрешения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2016. Т. 13. № 6. С. 224–232.
9. *Полищук Ю. М., Муратов И. Н., Полищук В. Ю.* (2016б) 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.
10. *Downing J. A., Prairie Y. T.* The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments // *Limnology and Oceanography.* 2006. V. 51. P. 2388–2397.
11. *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.
12. *Lehner B., Doll P.* Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // *J. Hydrology.* 2004. V. 296. P. 1–22.
13. *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.

Integration of space images of ultra high and medium resolution for the construction of size-distribution histograms of thermokarst lakes in the extended range of their sizes

**Yu. M. Polishchuk^{1,2}, A. N. Bogdanov¹, N. A. Bryksina³,
I. N. Muratov¹, V. Yu. Polishchuk^{4,5}**

¹ *Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk 628011, Russia
E-mail: yupolishchuk@gmail.com*

² *Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, Tomsk 634055, Russia*

³ *I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad 236041, Russia
E-mail: bryksina83@gmail.com*

⁴ *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
Tomsk 634021, Russia*

⁵ *Tomsk Polytechnic University, Tomsk 634050, Russia
E-mail: liquid_metal@mail.ru*

The article is devoted to the use of ultra-high resolution imagery in combination with mid-resolution imagery for constructing a histogram of the size-distribution of lakes from empirical histograms presented in a very wide range of lake areas, including small and very small lakes. Methodological issues of synthesizing two histograms for the size-distribution of lakes are considered, one of which is obtained from ultra high resolution imagery on a limited set of test sites, the other — on a mosaic of images of the middle resolution of the study area. To build the histograms, we used images of the middle resolution Landsat-8 and ultra high resolution Resource-P, QuickBird and GeoEye-1, reflecting the distributions of small and very small lakes. Remote studies using ultra high resolution imagery were

carried out on 37 test sites, located evenly enough in the territory of the cryolithozone of Western Siberia. A histogram of the size-distribution of lakes by areas in a very wide range of sizes from 5 m² to 20,000 hectares has been synthesized.

Keywords: permafrost, geoinformation systems, space images, histograms of lakes areas distribution, lognormal distribution law

Accepted: 04.04.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-9-17

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., *Osnovnye problemy matematicheskoy morfologii landshafta* (Key issues of landscape mathematical morphology), Moscow: Nauka, 2006, 252 p.
3. Viktorov A.S., Kapralova V.N., Trapeznikova O.N., Matematicheskaya model' morfologicheskoi struktury ozerno-termokarstovykh ravnin v izmenyayushchikhsya klimaticheskikh usloviyakh (Mathematical model of the lacustrine-termokarst plain morphostructure under the changing climatic conditions), *Kriosfera Zemli*, 2015, Vol. 19, No. 2, pp. 26–34.
4. Kravtsova V.I., Bystrova A.G., Izmenenie razmerov termokarstovykh ozer v razlichnykh raionakh Rossii za poslednie 30 let (Changes in thermokarst lake size in different regions of Russia for the last 30 years), *Kriosfera Zemli*, 2009, Vol. 13, No. 2, pp. 16–26.
5. 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), *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, Vol. 326, No. 12, pp. 104–114.
6. Polishchuk Yu.M., Bryksina N.A., Polishchuk V.Yu., Distantsionnyi analiz izmeneniya chisla i raspredeleniya po razmeram malykh termokarstovykh ozer kriolitozony Zapadnoi Sibiri (Remote analysis of changes in the number and distribution of small thermokarst lakes by sizes in cryolithozone of Western Siberia), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 3, pp. 34–42.
7. Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu., Bryksina N.A., Pokrovskiy O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S., Metodicheskie voprosy otsenki zapasov metana v malykh termokarstovykh ozerakh v zone merzloty Zapadnoi Sibiri (Methodical issues of evaluating methane capacity in small thermokarst lakes of Western Siberia permafrost), *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, Vol. 326, No. 2, pp. 127–135.
8. Polishchuk Yu.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Metodicheskie voprosy postroeniya obobshchennykh gistogramm raspredeleniya ploshchadei ozer v zone merzloty na osnove kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo razresheniya (Methodological issues of construction of generalized histograms of lake size-distribution in the permafrost based on the satellite images of middle and high resolution), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 224–232.
9. Polishchuk Yu.M., Muratov I.N., Polishchuk V.Yu., Issledovanie polei malykh termokarstovykh ozer v zone sploshnoi merzloty Zapadnoi Sibiri po sputnikovym snimkam vysokogo razresheniya (Studying the fields of small thermokarst lakes in the continuous permafrost of Western Siberia by high resolution satellite images), *Optika atmosfery i okeana*, 2016, Vol. 29, No. 7, pp. 592–597.
10. 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.
11. Holgerson M.A., Raymond P.A., Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds, *Nature Geoscience Letters*, 2016, Vol. 9, pp. 222–226.
12. Lehner B., Doll P., Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands, *J. Hydrol.*, 2004, Vol. 296, pp. 1–22.
13. 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.