

## Опыт и результаты дистанционного исследования озёр криолитозоны Западной Сибири по космическим снимкам различного разрешения за 50-летний период

Ю. М. Полищук<sup>1,2</sup>, А. Н. Богданов<sup>1</sup>, Н. А. Брыксина<sup>3</sup>, В. Ю. Полищук<sup>4,5</sup>,  
И. Н. Муратов<sup>1</sup>, М. А. Куприянов<sup>1</sup>, О. А. Байсалямова<sup>1</sup>, В. П. Днепровская<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Институт химии нефти СО РАН, Томск, 634021, Россия

<sup>3</sup> Балтийский федеральный университет им. Канта, Калининград, 236041, Россия  
E-mail: bryksina83@gmail.com

<sup>4</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
Томск, 634055, Россия

<sup>5</sup> Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия  
E-mail: liquid\_metal@mail.ru

Статья посвящена вопросам использования спутниковых снимков различного пространственного разрешения для получения экспериментальных данных о временных изменениях численности и площадей озёр криолитозоны Западной Сибири за большой период времени и их пространственном распределении по размерам в зоне мерзлоты. Обсуждены методические вопросы оценки погрешностей измерения площадей озёр по снимкам среднего разрешения. Приведены оценки влияния внутрисезонной динамики площадей озёр на точность дистанционного определения размеров озёр, полученных с использованием радарных снимков. На основе разновременных пар снимков сверхвысокого разрешения выявлено сокращение в среднем площадей озёр и уменьшение степени заозёрности территории криолитозоны Западной Сибири за 50-летний период. С использованием снимков среднего разрешения Landast-8 и снимков сверхвысокого разрешения QuickBird, GeoEye-1 и «Ресурс-П» построена единая (синтезированная) гистограмма распределения площадей озёр в широком интервале их размеров, учитывающая всю совокупность озёр в зоне мерзлоты — от самых малых до больших размеров. Для построения гистограммы получены данные о числе и площадях малых озёр по снимкам сверхвысокого разрешения на 37 тестовых участках, расположенных достаточно равномерно на исследуемой территории. Установлено соответствие полученной эмпирической гистограммы логнормальному закону распределения озёр с использованием критерия Пирсона. Определены значения параметров логнормального закона по экспериментальным данным.

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

Одобрена к печати: 01.12.2017  
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-42-55

### Введение

В настоящее время проводятся обширные исследования эмиссии парниковых газов в атмосферу из водных объектов в болотно-тундровых ландшафтах в северных широтах планеты. Мерзлота, являясь хранилищем законсервированного углерода в обширных мёрзлых торфяно-болотных ландшафтах на севере Евразии и Америки, при потеплении климата может стать источником возникновения ещё большего потепления при высвобождении парниковых газов. По данным работы (Petrovsky et al., 2011), одним из наиболее активных источников эмиссии метана и углекислого газа в арктических и субарктических районах Западной Сибири являются малые озёра с площадью менее 0,1–0,2 га.

Из-за своих малых размеров такие озёра, как правило, не учитываются в прогнозных оценках их вклада в общий парниковый эффект. В этих условиях получение обоснованных прогнозов эмиссии метана и углекислого газа из малых озёр в зоне вечной мерзлоты под действием климатических изменений является важной задачей, решение которой должно быть основано на использовании экспериментальных данных о динамике числа и площадей этих озёр и их пространственном распределении по размерам. Получение таких данных для территории Западной Сибири ввиду её труднодоступности из-за высокой степени заболоченности невозможно без применения дистанционных методов.

Дистанционным исследованиям временных изменений числа и площадей озёр в зонах мерзлоты различных регионов мира посвящено большое число работ. В статьях (Днепровская и др., 2009; Bryksina, Polishchuk, 2015; Shiklomanov et al., 2013 и др.) изложены результаты исследований временных изменений числа и площадей озёр, проведённых в Западной Сибири с использованием снимков среднего разрешения. Насколько нам известно, лишь единичные исследования временных изменений малых озёр (Байсалямова и др., 2015) выполнены в зоне мерзлоты Западной Сибири, которые потребовали использования снимков высокого и сверхвысокого разрешения.

Важными для задач прогнозирования объёмов эмиссии парниковых газов из озёр являются исследования распределения озёр по размерам. 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). В последнее время проведены дистанционные исследования распределения площадей озёр в криолитозоне Сибири и в других северных регионах (Викторов и др., 2015; Полищук и др., 2015; Karlson et al., 2014; Polishchuk et al., 2017). В частности, было установлено (Cael, Seekell, 2016; Verpoorter et al., 2014), что степенной закон распределения озёр по размерам для водоёмов менее 5–10 га даёт значительно завышенную численность озёр по сравнению с эмпирическими данными.

В большинстве дистанционных исследований использовались космические снимки среднего разрешения Landsat (разрешение 30 м), на которых не обнаруживаются озёра малых размеров (менее 0,5 га). Поэтому полученные по ним эмпирические распределения площадей озёр не учитывают вклад малых озёр, концентрация метана в которых, по данным статьи (Полищук и др., 2015; Holgerson, Raymond, 2016; Pokrovsky et al., 2011), значительно превышает его концентрацию в озёрах больших размеров. 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.

Поэтому большое значение приобретает задача построения гистограмм распределения площадей озёр по результатам дистанционных исследований, в которых учитывались бы практически все озёра исследуемой территории в широком диапазоне их размеров — от нескольких метров до десятков километров. Анализ таких гистограмм позволит определить вид теоретического закона распределения озёр по площадям, более адекватного эмпирическим данным, чем степенной закон. Такие гистограммы распределения озёр могут быть построены только на основе интеграции данных о численности и площадях водоёмов, получаемых из спутниковых снимков как среднего, так и высокого и сверхвысокого разрешений.

Методика и опыт построения гистограмм распределения озёр в диапазоне их размеров от 50 до 200 км<sup>2</sup> по снимкам среднего и высокого разрешений изложены в статье (Полищук и др., 2016). В связи с необходимостью изучения распределения озёр в более широком интервале размеров озёр, включающем и самые малые озёра (менее 50 м<sup>2</sup>), представляет интерес получение гистограмм распределения озёр на основе интеграции данных со спутниковых снимков среднего и сверхвысокого разрешения. Эта задача в настоящее время не решена.

В связи с изложенной основной целью работы явилось изложение результатов исследований временных изменений площадей малых озёр криолитозоны Западной Сибири и пространственного распределения озёр в очень широком диапазоне их размеров, включающем и малые озёра, по спутниковым снимкам среднего и сверхвысокого разрешения.

## Методические вопросы дистанционных исследований полей озёр криолитозоны Западной Сибири

Озёра в зоне мерзлоты Западной Сибири 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 м<sup>2</sup> до 2 га) и сверхмалые (менее 500 м<sup>2</sup>). Целесообразность выделения отдельной группы сверхмалых озёр обусловлена тем, что концентрация метана в них, согласно работе (Полищук и др., 2015; Holgerson, Raymond, 2016; Pokrovsky et al., 2011), более чем на порядок превышает его концентрацию в озёрах с размерами более 500 м<sup>2</sup>.

В наших дистанционных исследованиях озёр использовались оптические и радарные снимки среднего разрешения Landsat, ERS-2, ENVISAT и др., снимки высокого разрешения «Канопус-В» (разрешение 2,1 м), БКА (2,1 м), Alos (2,5 м), а также снимки сверхвысокого разрешения QuickBird (разрешение 0,6 м), GeoEye-1 (0,6 м), KH-7 (0,6 м) и «Ресурс-П» (0,7 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 геоинформационных систем ENVI, ERDAS Imagine, ArcGIS и др., была направлена на получение данных о численности и площади озёр.

Важными с точки зрения количественного определения параметров многолетней динамики площадей озёр являются вопросы точности дистанционного измерения площадей озёр по космическим снимкам. В общем случае на точность количественного определения параметров многолетней динамики площадей озёр оказывают влияние как погрешности измерения площадей озёр на космических снимках, так и внутрисезонные изменения площадей озёр, которые могут вызываться паводками, дождями, таянием снега и др. В связи с этим возникает необходимость исследования внутрисезонных изменений площадей озёр в тёплый период, длительность которого на территории многолетней мерзлоты не превышает трёх-четырёх месяцев в году. Вследствие преобладания облачной погоды на севере Западной Сибири в исследованиях внутрисезонной динамики площадей озёр использовались радарные снимки, которые не зависят от облачности.

Погрешности дистанционного измерения площадей озёр изучены в работе (Брыксина, Полищук, 2013). Результаты этих исследований показали, что для озёр с площадью 10 га и более средняя относительная погрешность определения их размеров по снимкам среднего разрешения составляет 3,5%, а для озёр с площадью 2 га и более она не превышает 5%. В этих исследованиях в качестве эталонных использовались изображения озёр на снимках сверхвысокого разрешения QuickBird.

Другим источником погрешностей дистанционных измерений площадей озёр в исследованиях их многолетней динамики, как отмечено выше, являются внутрисезонные изменения площадей озёр. Анализ величины этих изменений проведён в статье (Брыксина, Полищук, 2009). Вследствие преобладания облачной погоды на севере Западной Сибири для исследования внутрисезонной динамики площадей озёр использовались радарные снимки, которые не зависят от облачности. Для проведения этих исследований было выбрано шесть ключевых участков (Брыксина, Полищук, 2009), расположенных в разных подзонах многолетней мерзлоты. На каждый из участков подбирались радарные снимки ERS-2 и Envisat и безоблачные оптические снимки Landsat-5 и Landsat-7, полученные в пределах тёплого периода года с мая по сентябрь. Общее количество использованных снимков в двухлетнем периоде исследований составило 42, из них 8 снимков Landsat, 30 снимков ERS-2 и 4 снимка Envisat. В результате было установлено (Брыксина, Полищук, 2009), что величина относительного изменения суммарной площади озёр, усреднённая по всем исследованным участкам, не превышает 2%. Следовательно, внутрисезонные изменения не могут оказывать существенного влияния на точность дистанционного исследования многолетней динамики площадей озёр.

## Исследование временных изменений озёр

Исследования изменений числа и площадей озёр больших размеров, проведённые на территории криолитозоны Западной Сибири по снимкам Landsat, показали, что за 40-летний период, начиная с 1973 г., общая площадь озёр в среднем (по всем тестовым участкам, ТУ) сократилась в зоне сплошного распространения мерзлоты на 3,2% (Полищук и др., 2017), а в прерывистой зоне — приблизительно на 6–8% (Polishchuk et al., 2014). Согласно работе (Днепровская и др., 2009) наиболее вероятной причиной сокращения суммарной площади озёр можно рассматривать почвенный дренаж, вызываемый термоэрозийным разрушением берегов озёр и спуском воды в крупные озёра из малых молодых озёр, уровень воды в которых, как правило, выше, чем в больших более старых озёрах. Механизм такого спуска воды из озёр рассмотрен в статье (Kirpotin et al., 2008) применительно к криолитозоне Западной Сибири.

Очень интересными оказались результаты исследования изменения численности озёр криолитозоны Западной Сибири (Bryksina, Polishchuk, 2015), полученные по снимкам Landsat за 40-летний период с 1973 г. По данным этой работы, в криолитозоне Западной Сибири в последние три-четыре десятилетия наблюдаются два разнонаправленных процесса: исчезновение озёр и образование новых озёр. Совместный анализ данных о суммарных площадях и численности исчезнувших и образовавшихся озёр криолитозоны Западной Сибири показал, что при почти одинаковых величинах суммарных площадей исчезнувших и образовавшихся озёр количество новых озёр приблизительно в 18 раз превышает количество исчезнувших. Следовательно, вновь образовавшиеся озёра должны иметь значительно меньшие размеры, чем исчезающие озёра. Действительно, среднее значение площади новых озёр в 22 раза меньше соответствующей величины для исчезнувших озёр.

Исследование изменений численности озёр в зависимости от географической широты показывает, что по мере увеличения широты число исчезнувших озёр в среднем уменьшается, а число вновь образовавшихся — увеличивается. Из анализа изменений численности озёр по подзонам мерзлоты (Bryksina, Polishchuk, 2015) следует, что образование новых озёр происходит в основном в подзоне сплошной мерзлоты, а исчезновение озёр проявляется преимущественно в подзоне прерывистой мерзлоты. Как следует из вышеизложенного, вновь образующиеся озёра имеют, как правило, малые размеры. Такие озёра, согласно (Holgerson, Raymond, 2016; Pokrovsky et al., 2011), рассматриваются как интенсивные природные источники метана.

Для проведения исследований временных изменений малых озёр использованы снимки сверхвысокого разрешения с аппаратов KeyHole-7 (КН-7) и GeoEye-1 (все с разрешением 0,6 м). Спутник КН-7 использовался в период 1963–1967 гг. в американской разведывательной программе Gambit (Corona), спутниковые снимки были рассекречены и переданы в свободный доступ в 2002 г. Важность этих снимков для наших исследований обусловлена тем, что они являются единственными снимками сверхвысокого разрешения 60-х гг. прошлого века, позволяющими изучать изменения озёр на исследуемой территории за длительный промежуток времени (до 50 лет) сравнением их с современными снимками сверхвысокого разрешения «Ресурс-П», QuickBird и др.

Для проведения исследований в зонах прерывистой и островной мерзлоты Западной Сибири были выбраны шесть тестовых участков (ТУ), карто-схема расположения которых и их общая характеристика даны в статье (Байсалямова и др., 2015). Участки 1–3 располагались в островной зоне, а ТУ-4, ТУ-5 и ТУ-6 — в зоне прерывистой мерзлоты. Материалы съёмки со спутника КН-7 являются сканированными цифровыми копиями фотоплёнок, что затрудняет автоматическое дешифрирование снимков. Поэтому выделение озёр на снимках проводилось вручную визуальным дешифрированием с использованием средств ArcGIS 10.3. Минимальный размер озёр, выделяемых по снимкам КН-7 и GeoEye-1, ограничивался величиной 100 м<sup>2</sup> для всех тестовых участков для обеспечения сопоставимости и повышения достоверности результатов статистической обработки данных, полученных с разновременных снимков.

На основе данных результатов определения числа озёр и их площадей по космическим снимкам для каждого тестового участка были рассчитаны суммарная (общая) площадь озёр

( $S_{\text{сум}}$ ) на тестовом участке, плотность озёр и заозёрность территории. Степень заозёрности территории определялась в виде  $S_{\text{сум}}/S_o$ , где  $S_o$  — площадь тестового участка, а плотность озёр — как отношение  $n/S_o$ , где  $n$  — число озёр на тестовом участке. Результаты расчётов рассматриваемых характеристик представлены в *табл. 1*, из которой видно, что тестовые участки значительно различаются по степени заозёрности, числу и суммарной площади озёр.

*Таблица 1.* Изменение характеристик полей озёр за 50-летний период на разных тестовых участках

№ ТУ	Наименование спутника	Дата съёмки	R, %	Количество озёр	Общая площадь озёр, га	Плотность озёр, га <sup>-1</sup>	Степень заозёрности, %
1	КН-7 GeoEye-1	08.09.1963	16,9	453	279,19	0,56	35,1
		06.2013		609	326,41	0,76	40,9
2	КН-7 GeoEye-1	08.09.1963	-23,9	195	357,86	0,09	16,9
		07.2013		556	272,19	0,26	12,8
3	КН-7 GeoEye-1	08.09.1963	-4,3	522	1158,25	0,41	91,1
		07.2012		285	1108,69	0,22	87,2
4	КН-7 GeoEye-1	08.09.1963	-7,4	101	36,08	0,26	9,2
		08.2012		227	33,41	0,58	8,6
5	КН-7 GeoEye-1	08.09.1963	-9,1	282	172,02	0,07	4,1
		07.2010		635	156,41	0,15	3,7
6	КН-7 GeoEye-1	08.09.1963	-16,3	850	2432,79	2,18	62,5
		07.2010		1416	2035,63	3,64	52,3

На основе данных *табл. 1* был проведён анализ изменения числа и площадей озёр во времени. Для этого на каждом из тестовых участков были рассчитаны суммарные площади озёр в начальный ( $S_n$ ) и конечный ( $S_k$ ) годы наблюдений и определены относительные величины их изменения за период наблюдения по формуле:

$$R = \frac{S_k - S_n}{S} \times 100 \%. \quad (1)$$

По данным *табл. 1*, на исследованной территории при значительном росте численности озёр за прошедший 50-летний период в среднем наблюдается уменьшение степени заозёрности территории и сокращение общей площади малых озёр на 7,4%. Сравнение с приведёнными выше данными об изменении площади сравнительно больших озёр, полученными по снимкам Landsat, показывают хорошее соответствие данным о сокращении площадей озёр в прерывистой зоне (6–8%). Следовательно, как большие, так и малые озёра криолитозоны Западной Сибири проявляют одну и ту же тенденцию сокращения их общей площади.

Динамика озёр в горных долинах Алтая на юге Западной Сибири изучена недостаточно. В статье (Куприянов и др., 2016) излагаются результаты исследования временных изменений числа и площадей озёр в Горном Алтае, полученные по семи разновременным безоблачным снимкам Landsat (1974–2011). Обработка снимков проведена с использованием стандартных средств ERDAS Imagine 9.1 и ArcGIS 9.3. Исследования проведены на девяти тестовых участках, схема расположения которых дана в статье (Куприянов и др., 2016). В отличие от северных территорий Западной Сибири, где наблюдалось сокращение площади озёр, в горных долинах юга Западной Сибири обнаружен рост суммарной площади озёр в среднем (по всем тестовым участкам) до 8%, а число озёр показало незначительное сокращение на 0,4%.

## Исследования распределения озёр по размерам

Исследования распределения озёр в настоящей работе проводились в криолитозоне Западной Сибири с использованием космических снимков сверхвысокого разрешения «Ресурс-П», QuickBird и GeoEye-1 в сочетании со снимками Landsat-8. 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 — от нескольких метров до десятков километров.

Построение такой гистограммы распределения площадей озёр в чрезвычайно широком диапазоне изменения их размеров (от единиц квадратных метров до сотен квадратных километров) по спутниковым снимкам осуществлено по методике, изложенной в нашей работе (Полищук и др. 2016), в которой предложена трёхэтапная процедура построения гистограммы на основе интеграции спутниковых данных о площадях и численности озёр. Такая гистограмма является результатом синтеза двух исходных гистограмм распределения озёр, получаемых раздельно по снимкам сверхвысокого (СВР) и среднего (СР) разрешения. В связи с необходимостью построения единой гистограммы распределения площадей озёр на основе синтеза (объединения) двух исходных гистограмм распределения озёр предлагается для построения гистограмм выбирать частичные интервалы с неравномерным шагом (по логарифмическому закону), а именно: 5–10 м<sup>2</sup>, 10–20; 20–50; 50–100 м<sup>2</sup> и т.д. до 20 000 га, что позволяет представить данные о распределении озёр по интервалам их размеров достаточно компактно в очень широком диапазоне изменений площадей озёр. Всего было выбрано 23 частичных интервалов площадей.

Приведём ниже перечень этапов этой процедуры.

- Этап 1. Построение гистограммы распределения озёр по площадям, определяемым по снимкам СР, с целью учёта озёр преимущественно больших размеров.
- Этап 2. Построение гистограммы распределения озёр по площадям, определяемым по снимкам СВР, с целью учёта озёр сравнительно малых размеров.
- Этап 3. Объединение (синтез) двух исходных гистограмм распределения озёр, полученных на предыдущих этапах, в единую гистограмму распределения площадей озёр, учитывающую озёра в широком диапазоне размеров — от малых до больших.

Для получения исходной гистограммы распределения озёр сравнительно больших размеров с целью наиболее полного учёта озёр в криолитозоне Западной Сибири в работе (Полищук и др., 2016) была составлена мозаика снимков Landsat-8 за период 2013–2014 гг., с использованием которой были определены суммарная площадь озёр и их общая численность. Минимальный размер выделяемых на снимках озёр 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 озёр на территории криолитозоны Западной Сибири, позволившие определить число и площади озёр крупнее 0,5 га. Полученные данные о числе и площадях озёр 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).

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. Коллекция снимков для получения гистограммы на 2-м этапе включала СВР-снимки КА «Ресурс-П», QuickBird и GeoEye-1, обработка которых проводилась средствами ArcGIS 10.3 на сценах в границах 37 тестовых участков, достаточно равномерно распределённых по территориям островной, прерывистой и сплошной криолитозон Западной Сибири. Тестовые участки выбирались нами, как принято в подобных исследованиях, в местах скопления озёр. Схема размещения тестовых участков на исследуемой территории и краткая характеристика как самих участков, так и использованных в работе СВР-снимков, дана на *рис. 2* и в *табл. 2*. Выбранные тестовые участки имели приблизительно одинаковые размеры. Суммарная площадь всех ТУ составляла около 0,013 млн га, что соответствует 0,0001 % от всей площади исследованной территории криолитозоны Западной Сибири.

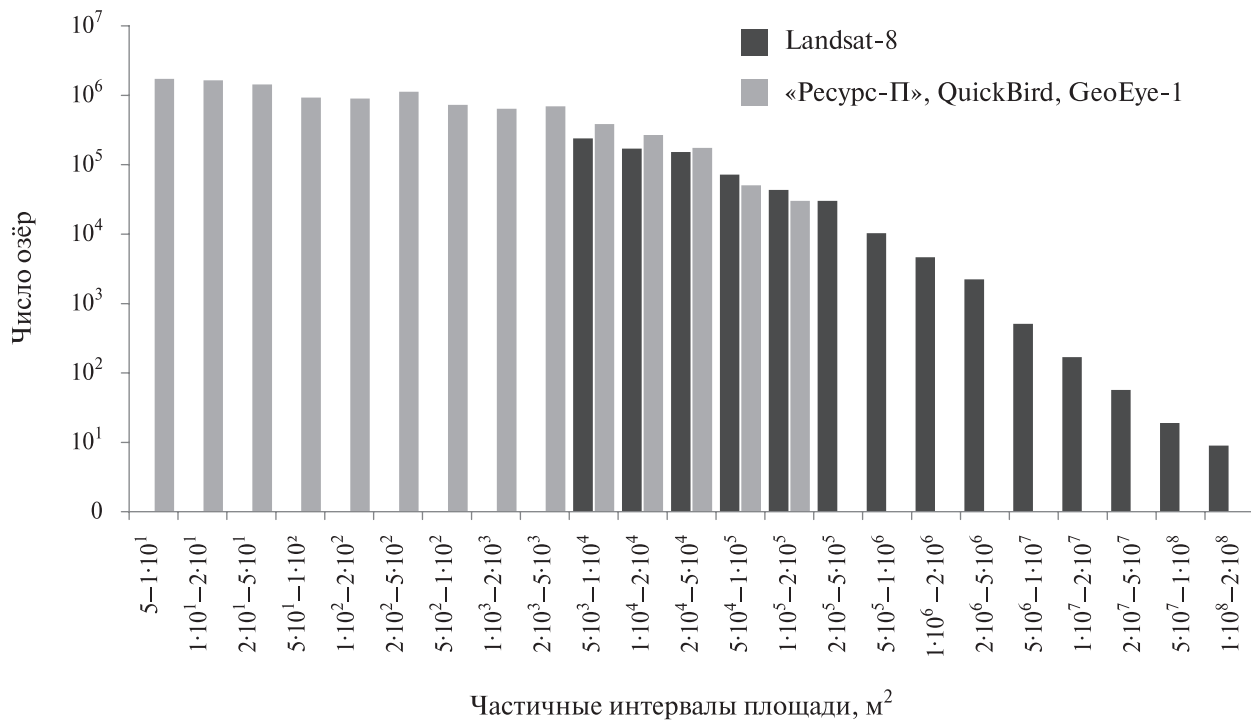


Рис. 1. Иллюстрация совмещения графиков двух исходных гистограмм

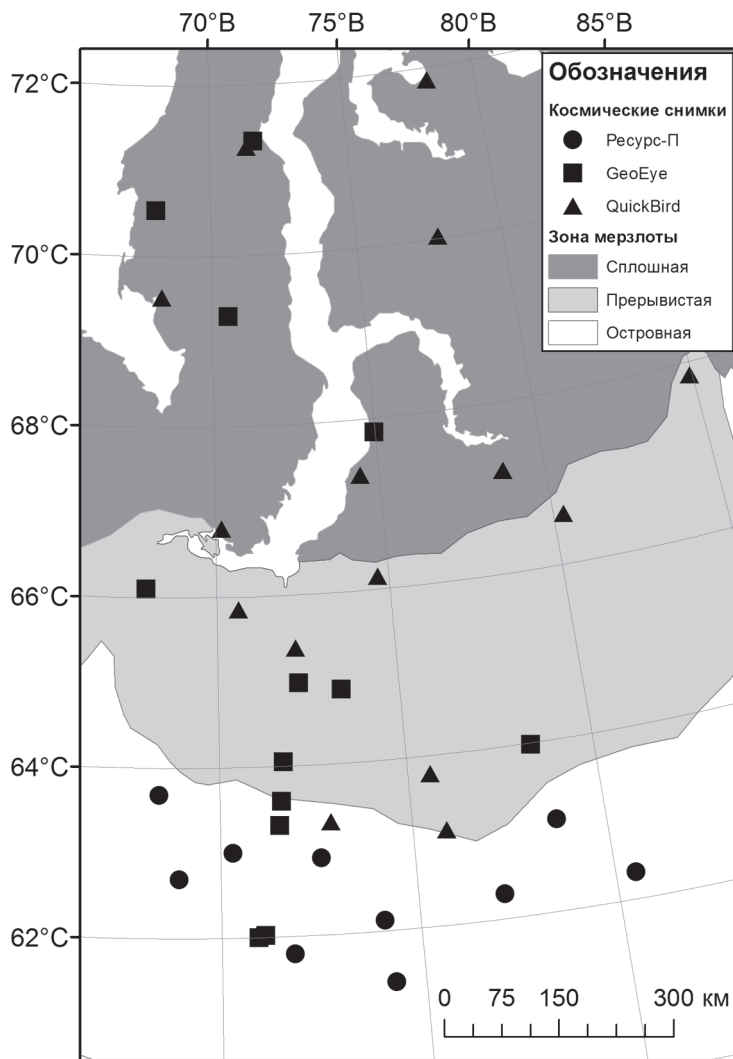


Рис. 2. Схема расположения тестовых участков

Таблица 2. Характеристика тестовых участков и космических снимков сверхвысокого разрешения

Зона мерзлоты	Космический аппарат	Количество ТУ	Средняя площадь ТУ	Период съёмки
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

Как видно из *табл. 2*, собранные разновременные СВР-снимки относятся к 13-летнему периоду (2003–2016). По данным работы (Кравцова, Родионова, 2016), за 40-летний период с 1970–1980-х гг. сокращение числа и площадей озёр составило в среднем по территории криолитозоны России 0,5 и 2,9% соответственно, а их увеличение — 0,5 и 1,2% соответственно. Следовательно, влияние гидрологических, климатических, метеорологических и других факторов на численность и площади озёр на территории криолитозоны, которое в среднем за длительный период не превышает первых единиц процентов, следует признать незначительным. Это может служить обоснованием возможности использования СВР-снимков в 13-летнем интервале в исследованиях распределения озёр.

В качестве второй исходной гистограммы распределения площадей озёр сравнительно малых размеров, полученной на 2-м этапе, использована гистограмма распределения озёр, построенная на основе данных о числе озёр со снимков ВР по методике статьи (Полищук и др., 2016), предполагающей распространение (экстраполяцию) данных о числе и площадях озёр, определённых на ограниченной совокупности тестовых участков, на всю территорию исследований. Введённый в работе (Полищук и др., 2016) коэффициент экстраполяции в настоящей работе рассчитывался как среднее арифметическое отношения числа озёр на основе снимков среднего разрешения (по всей территории) к общему количеству озёр по данным со снимков СВР (по всем тестовым участкам) в каждом интервале области перекрытия двух исходных гистограмм. В нашем случае получено значение коэффициента экстраполяции  $K = 839$ . Распределяя расчётное число озёр на исследуемой территории, полученное на основе экстраполяции данных со снимков СВР, по интервалам площадей, построим вторую исходную гистограмму распределения озёр по их площадям, которая отображается на *рис. 1* чёрными столбиками в диапазоне изменения площадей от 5 до  $2 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ .

Рассмотрим создание единой (синтезированной) гистограммы распределения площадей озёр (3-й этап) в широком диапазоне их размеров на основе объединения (синтеза) двух исходных гистограмм. На *рис. 1* эти исходные гистограммы имеют перекрывающуюся область (перекрывающиеся интервалы) шириной пять интервалов в диапазоне от  $5 \cdot 10^3$  до  $2 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ . Согласно работе (Брыксина, Полищук, 2013) практически приемлемая погрешность дистанционного измерения площади озера с изображений среднего разрешения достигается при размерах озёр 2 га ( $2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ ) и более. Поэтому синтезированную гистограмму распределения площадей озёр можно получить «сшиванием» двух исходных гистограмм в точке, соответствующей площади  $2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ .

Синтезированная гистограмма, полученная в результате этого «сшивания», представляет распределение озёр в широком диапазоне размеров от 5 до  $2 \cdot 10^8 \text{ м}^2$ . Заметим, что общее число озёр криолитозоны Западной Сибири составляет 8,7 млн с общей площадью около 6,4 млн га. Из них около половины численности (44%) занимают сверхмалые озёра, общая площадь которых крайне незначительна (0,1%). Однако крупные озёра (более  $2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ ), численность которых не превышает 3,6% от их общего количества, составляют 86,6% от общей площади озёр.

Рассмотренная выше методология построения гистограмм распределения озёр на основе интеграции данных из спутниковых снимков разного разрешения позволяет получить гистограмму распределения площадей озёр в широком диапазоне их размеров с учётом как больших, так и малых и сверхмалых озёр.



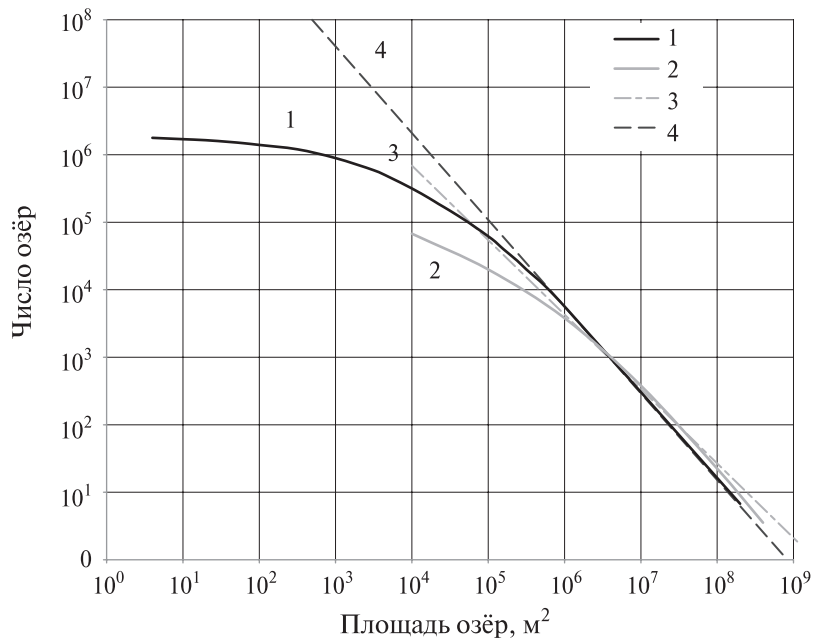


Рис. 3. График гистограммы распределения озёр по размерам на территории криолитозоны Западной Сибири (1) в сравнении с аналогичной гистограммой для Швеции (2), по данным (Cael, Seekell, 2016). Линии степенной аппроксимации гистограмм обозначены: 3 — для Западной Сибири, 4 — для Швеции

График синтезированной гистограммы распределения озёр по их размеру в широком диапазоне размеров (от 5 до  $2 \cdot 10^8 \text{ м}^2$ ) представлен на рис. 3 (кривая 1), где для сравнения приведён график эмпирической гистограммы распределения озёр (рис. 3, кривая 2) в Швеции (Cael, Seekell, 2016), которая учитывает лишь озёра с размерами более  $10^4 \text{ м}^2$ .

Заметим, что авторы статьи (Cael, Seekell, 2016) отмечают отклонение реальных распределений озёр по размерам от степенного закона, широко используемого в настоящее время для оценки объёмов эмиссии метана и углекислого газа в атмосферу из водоёмов. На рис. 3 пунктирная (3) и штрих-пунктирная (4) линии представляют графики степенной аппроксимации гистограмм для Западной Сибири и Швеции соответственно. Как видно на рис. 3, в распределении озёр как для Швеции, так и для Западной Сибири при размерах озёр менее  $10^5 \dots 2 \cdot 10^5 \text{ м}^2$  (10–20 га) наблюдается значительное отклонение от степенного закона, которое проявляется в сокращении реальной численности озёр по сравнению со степенным законом.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость определения вида теоретического закона распределения озёр по размерам, более соответствующего эмпирическим данным, чем степенной закон. Для этого будем использовать полученную нами гистограмму распределения озёр в очень широком диапазоне размеров, включая и малые озёра.

### Определение вида закона распределения озёр по размерам

Важнейшим достоинством и новизной полученной нами гистограммы для Западной Сибири является учёт малых озёр в интервале площадей  $5 \dots 5 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ , что позволяет изучить особенности распределения озёр малых размеров. Как видно на рис. 3, в этом диапазоне размеров наблюдается значительно большее отклонение от степенного закона, что может проявляться в виде завышения численности озёр, например, в интервале площадей 10–100  $\text{м}^2$  более чем на 2–3 порядка. Сходный характер гистограмм на рис. 3 позволяет на качественном уровне предсказать, что распределение размеров озёр в области малых озёр как в других регионах, так и в планетарном масштабе будет ещё более значительно расходиться со степенным законом. В частности, оценки запасов метана и углекислого газа в малых озёрах планеты при обычно используемом для этих целей степенном законе их распределения по размерам будут значительно завышенными. Иллюстрацией завышения численности малых озёр (и, соответственно,

объёмов эмиссии метана) является работа (Holgerson, Raymond, 2016), в которой для расчёта числа малых озёр ввиду отсутствия экспериментальных данных был использован степенной закон распределения их размеров.

Согласно работам (Вентцель, Овчаров, 2000; Кремер, 2004) в математической статистике известно два подхода к решению задачи определения вида закона распределения случайной величины по эмпирическим данным: либо использование теоретического закона распределения, известного из теории изучаемого объекта, либо перебор изученных в статистике видов законов распределения с целью выявления наиболее соответствующего экспериментальным данным закона распределения с использованием математического аппарата проверки статистических гипотез, например с применением программных средств Statistica, Excel и др. В работе (Викторов и др., 2015) теоретически обоснована возможность использования логнормального закона для описания распределения озёр по размерам.

Согласно работе (Кремер, 2004) плотность вероятности для логнормального закона распределения площади озёр ( $s$ ) определяется уравнением:

$$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot s\sigma} \exp\left\{-\frac{(\ln s - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (2)$$

где  $s$  — площадь озёр;  $\mu$  — математическое ожидание;  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение.

Оценки параметров  $\mu$  и  $\sigma$  теоретического логнормального закона распределения площадей озёр могут быть получены из выборочных данных. В нашем случае оценки математического ожидания ( $M$ ) и дисперсии ( $D$ ) для озёр криолитозоны Западной Сибири рассчитывались по формулам:

$$M = \sum_{i=1}^m (\ln s_i \cdot w_i), \quad (3)$$

$$D = \sum_{i=1}^m (\ln s_i)^2 \cdot w_i - M^2, \quad (4)$$

где  $w_i$  — относительная частота (число озёр);  $m$  — число частичных интервалов;  $i$  — номер интервала.

Используя полученные данные о численности и площадях озёр в широком диапазоне их размеров и учитывая, что  $m = 23$ , по формулам (3) и (4) найдём:  $M = 4,45$  и  $d = 5,93$ . Выполненная проверка соответствия эмпирического и теоретического распределений с использованием критерия Пирсона показала, что величина расчётного  $\chi^2$  равна 0,23, и, следовательно, синтезированная гистограмма распределения площадей озёр, полученная в широком диапазоне их размеров, может быть принята соответствующей логнормальному закону с высокой вероятностью 0,999.

## Заключение

Представлены результаты исследования временных изменений площадей и числа озёр криолитозоны Западной Сибири и пространственного распределения озёр в очень широком диапазоне их размеров, включающем и малые озёра, по спутниковым снимкам различного пространственного разрешения. Исследования выполнены на территории сплошного, прерывистого и островного распространения многолетней мерзлоты и горных долинах Алтая. Для проведения исследований использованы спутниковые снимки КН-7, «Ресурс-П», QuickBird, GeoEye-1, «Канопус-В», БКА, Alos и Landsat за период с 1963 по 2016 г., позволившие с помощью средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3 определить число и площади озёр.

В результате исследования временных изменений было выявлено, что за 50-летний период в зонах прерывистой и островной мерзлоты Западной Сибири в среднем наблюдается уменьшение степени заозёрности территории и сокращение общей площади малых озёр на 7,4%. В горных долинах Алтая обнаружен рост суммарной площади озёр в среднем (по всем

тестовым участкам) до 8%, а число озёр показало незначительное сокращение на 0,4%. Изучены распределения озёр в широком диапазоне размеров от 0,0005 до 20 000 га. Проверка соответствия эмпирического и теоретического распределений с использованием критерия Пирсона показала, что распределение озёр по размерам с высокой вероятностью 0,999 соответствует логнормальному закону.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ по проектам №14-35-50521, 15-35-50620, 15-45-00075 и 16-35-50143.

## Литература

1. Байсалямова О. А., Богданов А. Н., Муратов И. Н., Полищук Ю. М., Снигирева М. С. Пространственное распределение малых термокарстовых озёр Западной Сибири по снимкам КН-7 и GeoEye-1 // Вестник ЮГУ. 2015. Вып. 3. С. 69–73.
2. Брыксина Н. А., Полищук Ю. М. Анализ сезонных изменений площадей термокарстовых озёр в зоне вечной мерзлоты Западной Сибири с использованием снимков ERS-2 // Исследование Земли из космоса. 2009. № 3. С. 90–93.
3. Брыксина Н. А., Полищук Ю. М. Исследование точности дистанционного измерения площадей озёр с использованием космических снимков // Геоинформатика. 2013. № 1. С. 64–68.
4. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. М.: Высш. шк., 2000. 480 с.
5. 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.
6. Днепровская В. П., Брыксина Н. А., Полищук Ю. М. Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исследование Земли из космоса. 2009. № 4. С. 86–95.
7. Кравцова В. И., Родионова Т. В. Исследование динамики площади и количества термокарстовых озёр в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 1. С. 81–89.
8. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.
9. Куприянов М. А., Полищук Ю. М., Шаронов Д. С. Исследование динамики численности и размеров термокарстовых озёр в горных районах Алтая по космическим снимкам // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2016. Т. 19. № 6. С. 107–111.
10. 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 озёрах криолитозоны Западной Сибири // Изв. Томского политехн. ун-та. 2015. Т. 326. № 2. С. 127–135.
11. Полищук Ю. М., Богданов А. Н., Муратов И. Н. Методические вопросы построения обобщённых гистограмм распределения озёр в зоне мерзлоты на основе космических снимков среднего и высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли. 2016. Т. 13. № 6. С. 224–232.
12. Полищук Ю. М., Куприянов М. А., Брыксина Н. А. Дистанционное исследование динамики площади озёр в сплошной криолитозоне Сибири // География и природные ресурсы. 2017. № 3. С. 164–170.
13. 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 // Kriosfera Zemli. 2015. V. 19. No. 2. P. 100–105.
14. Cael B. B., Seekell D. A. The size-distribution of Earth's lakes: Scientific Reports. 2016. No. 6. Article number: 29633. DOI:10.1038/srep29633.
15. 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.
16. Holgerson M. A., Raymond P. A. Large contribution to inland water CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from very small ponds // Nature Geoscience Letters. 2016. V. 9. P. 222–226.
17. 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. P. 621–636.
18. Kirpotin S., Polishchuk Y., Zakharova E., Shirokova L., Pokrovsky O., Kolmakova M., Dupre B. One of possible mechanisms of thermokarst lakes drainage in West-Siberian north // Intern. J. Environmental Studies. 2008. V. 65. No. 10. P. 631–635.

19. 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.
20. Polishchuk Y. M., Bogdanov A. N., Polishchuk V. Y., Manasyrov R. M., Shirokova L. S., Kirpotin S. N., Pokrovsky O. S. Size distribution, surface coverage, water, carbon, and metal storage of thermokarst lakes in the permafrost zone of the Western Siberia lowland // *Water*. 2017. V. 9. Iss. 3. 18 p.
21. Polishchuk Yu., Kirpotin S., Bryksina N. Remote study of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 5 // *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems* / ed. O. Pokrovsky. N. Y.: Nova Science Publishers, 2014. P. 173–204.
22. Shiklomanov A. I., Lammers R. B., Lettermaier D. P., Polishchuk Y. M., Savichev O. G., Smith L. C. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections // *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences* / eds. P. Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht — Heidelberg — New-York — London: Springer, 2013. P. 111–154.
23. Verpoorter C., Kutser T., Seekel D. A., Tranvik L. J. A global inventory of lakes based on high resolution satellite imagery // *Geophysical Research Letters*. 2014. V. 41. P. 1–7.

## Experience and results of a remote study of lakes in the permafrost zone of Western Siberia from satellite images of various resolutions over a 50-year period

Y. M. Polishchuk<sup>1,2</sup>, A. N. Bogdanov<sup>1</sup>, N. A. Bryksina<sup>3</sup>, V. Y. Polishchuk<sup>4,5</sup>,  
I. N. Muratov<sup>1</sup>, M. A. Kupriyanov<sup>1</sup>, O. A. Baisalyamova<sup>1</sup>, V. P. Dneprovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Yugra Research Institute of Information Technologies,  
Khanty-Mansiysk 628011, Russia  
E-mail: yupolishchuk@gmail.com*

<sup>2</sup> *Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, Tomsk 634050, Russia*

<sup>3</sup> *Kant Baltic Federal University, Kaliningrad 236041, Russia  
E-mail: bryksina83@gmail.com*

<sup>4</sup> *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS,  
Tomsk 634055, Russia*

<sup>5</sup> *Tomsk Polytechnic University, Tomsk 634050, Russia  
E-mail: liquid\_metal@mail.ru*

The article is devoted to the use of satellite images of various spatial resolutions to obtain experimental data on temporal changes in the number and area of lakes in the permafrost zone of Western Siberia over a long period of time and their spatial size-distribution in the permafrost zone. Methodical issues of errors in the measurement of lake areas on mid-resolution images are discussed. Estimates of the influence of the intraseasonal dynamics of lake areas on the accuracy of remote measurement of lake sizes obtained with the use of radar images are given. On the basis of multi-temporal pairs of ultra-high resolution images, a decrease in average of lakes area and the limnicity of the permafrost zone of Western Siberia over a 50-year period was revealed. A synthesized histogram of the lake distribution in a wide range of their sizes was constructed using the Landsat-8 images and ultra-high resolution images of QuickBird, GeoEye-1 and Resurs-P, taking into account all the lakes in the permafrost zone — from the smallest to the largest sizes. For the construction of the histogram, data were obtained on the number and areas of small lakes from ultra-high resolution images at 37 test sites, located fairly evenly in the study area. The correspondence of the received empirical histogram to the lognormal distribution of lakes was established using the Pearson criterion. The values of the parameters of the lognormal law were determined from the experimental data.

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

Accepted: 01.12.2017  
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-42-55

## References

1. Baisalyamova O. A., Bogdanov A. N., Muratov I. N., Polishchuk Y. M., Snigireva M. S., Prostranstvennoe raspredelenie malyykh termokarstovykh ozer Zapadnoi Sibiri po snimkam KH-7 i GeoEye-1 (Spatial distribution of small thermokarst lakes of Western Siberia from the images of KH-7 and GeoEye-1), *Vestnik YuGU*, 2015, Issue 3, pp. 69–73.
2. Bryksina N. A., Polishchuk Y. M., Analiz sezonnykh izmenenii ploshchadei termokarstovykh ozer v zone vechnoi merzloty Zapadnoi Sibiri s ispol'zovaniem snimkov ERS-2 (The analysis of seasonal dynamics of thermokarst lakes areas with use of space images ERS 2), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 3, pp. 90–93.
3. Bryksina N. A., Polishchuk Y. 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.
4. Venttsel' E. S., Ovcharov L. A., Teoriya veroyatnostei i ee inzhenernye prilozheniya (Probability theory and its engineering applications), Moscow: *Vysshaya shkola*, 2000, 480 p.
5. 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.
6. Dneprovskaya V. P., Bryksina N. A., Polishchuk Y. M., Izuchenie izmenenii termokarsta v zone preryvistogo rasprostraneniya vechnoi merzloty Zapadnoi Sibiri na osnove kosmicheskikh snimkov (Study of thermokarst changes in discontinuous zone of West-Siberian permafrost based on space images), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 4, pp. 86–95.
7. Kravtsova V. I., Rodionova T. V., Issledovanie dinamiki ploshchadi i kolichestva termokarstovykh ozer v razlichnykh raionakh kriolitozony Rossii po kosmicheskikh snimkam (Investigation of the dynamics in area and number of thermokarst lakes in various regions of Russian cryolithozone, using satellite images), *Kriosfera Zemli*, 2016, Vol. 20, No. 1, pp. 81–89.
8. Kremer N. S., *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* (Theory of Probability and Mathematical Statistics), Moscow: YuNITI-DANA, 2004, 573 p.
9. Kupriyanov M. A., Polishchuk Y. M., Sharonov D. S., Issledovanie dinamiki chislennosti i razmerov termokarstovykh ozer v gornyykh raionakh Altaya po kosmicheskikh snimkam (The study of the thermokarst lakes amount and size dynamics in the highlands of Altai by satellite images), *Problemy okruzhayushchei sredy i prirodnyykh resursov*, 2016, Vol. 19, No. 6, pp. 107–111.
10. Polishchuk Y. 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), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 224–232.
11. Polishchuk Y. M., Kupriyanov M. A., Bryksina N. A., Distantsionnoe issledovanie dinamiki ploshchadi ozer v sploshnoi kriolitozone Sibiri (Remote study of lake area dynamics in the continuous cryolithozone of Siberia), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2017, No. 3, pp. 164–170.
12. Polishchuk Y. M., Polishchuk V. Yu., Bryksina N. A., Pokrovskiy O. S., Kirpotin S. N., Shirokova L. S., Metodicheskie voprosy otsenki zapasov metana v malyykh 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.
13. Bryksina N. A., Polishchuk Y. M., Analiz izmeneniya chislennosti termokarstovykh ozer v zone merzloty Zapadnoy Sibiri na osnove kosmicheskikh snimkov (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.
14. Cael B. B., Seekell D. A., *The size-distribution of Earth's lakes*, 2016, No. 6, Article number: 29633. DOI:10.1038/srep29633.
15. Downing J. A., Prairie Y. T., The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments, *Limnology and Oceanography*, 2006, Vol. 51, pp. 2388–2397.
16. Holgerson M. A., Raymond P. A., Large contribution to inland water CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from very small ponds, *Nature Geoscience Letters*, 2016, Vol. 9, pp. 222–226.
17. 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.

18. Kirpotin S., Polishchuk Y., Zakharova E., Shirokova L., Pokrovsky O., Kolmakova M., Dupre B., One of possible mechanisms of thermokarst lakes drainage in West-Siberian North, *International Journal of Environmental Studies*, 2008, Vol. 65, No. 10, pp. 631–635.
19. 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.
20. Polishchuk Y. M., Bogdanov A. N., Polishchuk V. Y., Manasypov R. M., Shirokova L. S., Kirpotin S. N., Pokrovsky O. S., Size distribution, surface coverage, water, carbon, and metal storage of thermokarst lakes in the permafrost zone of the Western Siberia lowland, *Water*, 2017, Vol. 9, Issue 3, 18 p.
21. Polishchuk Yu., Kirpotin S., Bryksina N., Remote study of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Chapter 5, *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems*, New York: Nova Science Publishers, 2014, pp. 173–204.
22. Shikhomanov A. I., Lammers R. B., Lettermaier D. P., Polishchuk Y. M., Savichev O. G., Smith L. C., Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections, *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*, Dordrecht — Heidelberg — New-York — London: Springer, 2013, pp. 111–154.
23. Verpoorter C., Kutser T., Seekell D. A., Tranvik, L. J., A global inventory of lakes based on high resolution satellite imagery, *Geophysical Research Letters*, 2014, Vol. 41, pp. 1–7.