

УДК 551.345:528.88

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДЕЙ ОЗЕР КРИОЛИТОЗОНЫ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИХ РАЗМЕРОВ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

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

Богданов Александр Николаевич¹,
albo06@yandex.ru

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

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

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

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

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью установления вида закона распределения площадей озер для задач моделирования и прогноза динамики полей термокарстовых озер и запасов метана в них на обширных территориях арктической и субарктической зон в Сибири и других регионах мира.

Цель работы: определение вида закона распределения площадей термокарстовых озер в криолитозоне в широком диапазоне их размеров на основе синтезированной гистограммы распределений озер, полученной по космическим снимкам среднего и высокого разрешения криолитозоны Западной Сибири.

Методы: дистанционные методы исследования полей термокарстовых озер с использованием спутниковых снимков; метод тестовых (ключевых) участков; метод определения зон активного термокарста по спутниковым снимкам; методы геоинформационных систем для пространственного анализа данных о термокарстовых озерах, полученных из спутниковых изображений; статистические методы в определении вида закона распределения случайных величин по эмпирическим данным с использованием критерия согласия Пирсона.

Результаты. Рассмотрены кратко методические вопросы синтеза двух гистограмм распределения площадей озер, одна из которых получается по снимкам среднего разрешения, другая – по снимкам высокого разрешения на ограниченной совокупности тестовых участков на территории исследований. Для построения гистограмм использованы снимки среднего разрешения Landsat-8 и снимки высокого разрешения Канопус-В, БКА и Alos. Дистанционные исследования по снимкам высокого разрешения проведены на 66 тестовых участках, расположенных достаточно равномерно на территории криолитозоны Западной Сибири. В результате получена синтезированная гистограмма распределения озер по площадям в очень широком диапазоне их размеров от 50 м² до 20 тыс. га. Статистический анализ показал, что эмпирическое распределение озер по площадям, согласно критерию Пирсона, соответствует логнормальному закону распределения. Определены параметры логнормального закона распределения площадей озер по эмпирическим данным.

Ключевые слова:

Многолетняя мерзлота, геоинформационные системы, космические снимки, гистограмма распределения озер по площадям, логнормальный закон распределения.

Введение

Для оценки и прогноза объемов накопления метана в озерах необходимы знания о виде закона распределения озер по площадям. Наибольшее распространение в таких работах получил степенной закон распределения озер по площадям, подтверждаемый результатами анализа данных глобальной инвентаризации водоемов [1, 2], основанными на картографических и спутниковых материалах. В этих исследованиях были использованы данные о численности и размерах озер на земном шаре с площадями более 1 га на основе мозаики космических снимков Landsat. Однако в последние годы с использованием алгоритмов, позволяющих прово-

дить более тщательный анализ космических изображений Landsat, были предприняты [3, 4] попытки дополнительно включить в анализ совокупности озер с меньшими размерами – от 0,2 до 1 га. Учет таких озер при построении гистограмм распределения их площадей позволил явно обнаружить отклонение вида распределения размеров озер от степенного закона. Однако каких-либо соображений о конкретном виде закона распределения озер по размерам в цитированных работах не приводится.

Глобальное потепление климата последних десятилетий привело к значительному ускорению термокарстовых процессов в зоне многолетней

мерзлоты, которое сопровождается ростом концентрации метана и углекислого газа в термокарстовых озерах. Ввиду труднодоступности и высокой степени заболоченности территории в зонах мерзлоты получение данных об изменении численности и распределении площадей термокарстовых озер в зоне мерзлоты возможно только с применением методов дистанционного зондирования поверхности Земли. В последнее время проведены дистанционные исследования распределения площадей термокарстовых озер в Сибири и в некоторых других северных регионах, результаты которых рассматриваются в [5–7]. В большинстве этих исследований использовались космические снимки среднего разрешения Landsat, позволившие подтвердить степенной вид закона распределения площадей.

Многолетний опыт использования снимков среднего разрешения Landsat, обеспечивающих многократное полное покрытие земного шара, показывает, что в исследованиях термокарстовых озер на этих снимках не обнаруживаются озера малых размеров. Поэтому полученные по ним эмпирические распределения площадей озер в сравнительно небольшом диапазоне их размеров не учитывают вклад малых термокарстовых озер, концентрация метана в которых, согласно [8, 9], более чем на порядок превышает его концентрацию в озерах с размерами более 0,1–0,5 га. В связи с этим для учета малых озер следует применять снимки более высокого пространственного разрешения. Однако такие 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 больших размеров, в которых также накапливаются определенные 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 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 среднего, так и высокого разрешений. Элементы методологии объединения данных о площадях озер, получаемых из снимков различного пространственного разрешения с целью построения единых (синтезированных) гистограмм распределения площадей озер в очень широком диапазоне их размеров, рассмотрены в наших работах [10, 11].

Целью настоящей работы явилось исследование вопросов определения вида закона распределения площадей озер с использованием синтезированной гистограммы распределения площадей озер, полученной путем интеграции данных с космических

снимков среднего и высокого разрешения на территории криолитозоны Западной Сибири.

Методические вопросы проведения исследования

Информационной основой исследования закона распределения термокарстовых озер по размерам являются данные дистанционного измерения площадей озер по космическим снимкам исследуемой территории. Согласно [12], образование термокарстовых озер происходит под воздействием нескольких факторов, главными из которых являются наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород и равнинный характер территории. В [13] 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) в сочетании со снимками высокого разрешения Канопус-В (разрешение 2,1 м), БКА (2,1 м; белорусский аналог российского спутника Канопус-В) и Alos (2,5 м). Все снимки были получены 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 с существенно различающимися размерами.

Насколько нам известно, в настоящее время вопросы построения гистограмм распределения площадей озер в чрезвычайно широком диапазоне изменения их размеров (от десятков м² до сотен км²) изучены недостаточно. В работе [10] предложена трехэтапная процедура построения таких гистограмм на основе интеграции спутниковых данных о площадях и численности озер, которые являются результатом синтеза двух исходных гистограмм распределения озер, получаемых отдельно по снимкам высокого (ВР) и среднего (СР) разрешения. Вопросам построения обобщенной гистограммы по снимкам высокого разрешения посвящена работа [11]. В связи с необходимостью построения единой гистограммы распределения площадей озер на основе синтеза (объединения) двух исходных гистограмм распределения озер предлагается для построения гистограмм выбирать частичные интервалы с неравномерным шагом (по логарифмическому закону), а именно: 50–100, 100–200, 200–500, 500–1000 м² и т. д. до 20000 га, что позволяет представить данные о распределении озер по интервалам их размеров достаточно компактно в очень широком диапазоне изменений площадей

озер. Всего было выбрано 20 частичных интервалов площадей.

Приведем ниже перечень этапов этой процедуры.

1. Построение гистограммы распределения озер по площадям, определяемым по снимкам СР, с целью учета озер преимущественно больших размеров.
2. Построение гистограммы распределения озер по площадям, определяемым по снимкам ВР с целью учета озер сравнительно малых размеров.
3. Объединение (синтез) двух исходных гистограмм распределения озер, полученных на предыдущих этапах, в единую гистограмму распределения площадей озер, учитывающую озеро в широком диапазоне размеров – от малых до больших размеров.

Дадим характеристику этапов этой процедуры.

На **1-м этапе** для получения первой исходной гистограммы распределения озер сравнительно больших размеров (условимся называть их большими озерами) 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 численность и суммарная площадь озер. 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 всех озер крупнее 0,5 га на исследуемой территории. Полученные данные о

числе и площадях озер по снимкам СР, распределенные по указанным выше частичным интервалам площадей в логарифмическом масштабе, представлены в виде первой исходной гистограммы распределения площадей озер с размерами от 0,5 до 20000 га на рис. 1 (синие столбики), заимствованном из статьи [10] и дополненным.

На **2-м этапе** предусмотрено построение другой исходной гистограммы, представляющей озеро преимущественно малых размеров (будем называть их условно малыми озерами) и полученной по снимкам высокого разрешения. На этом этапе для получения данных дистанционного исследования использовался метод тестовых (ключевых) участков (ТУ). Обработка снимков высокого разрешения Канопус-В, БКА и Alos проводилась средствами ArcGIS 10.3 на сценах в границах 66 тестовых участков, достаточно равномерно распределенных по территориям островной, прерывистой и сплошной криолитозон Западной Сибири. Схема размещения тестовых участков на территории криолитозоны Западной Сибири и краткая характеристика как этих участков, так и использованных в работе снимков ВР дана в [11]. 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 [12, 14]. Выбранные тестовые участки имели приблизительно одинаковые размеры (в среднем около 3000 га). Суммарная площадь всех ТУ составляла около 0,2 млн га, что соответствует 0,002 % от всей площади исследованной территории криолитозоны Западной Сибири.

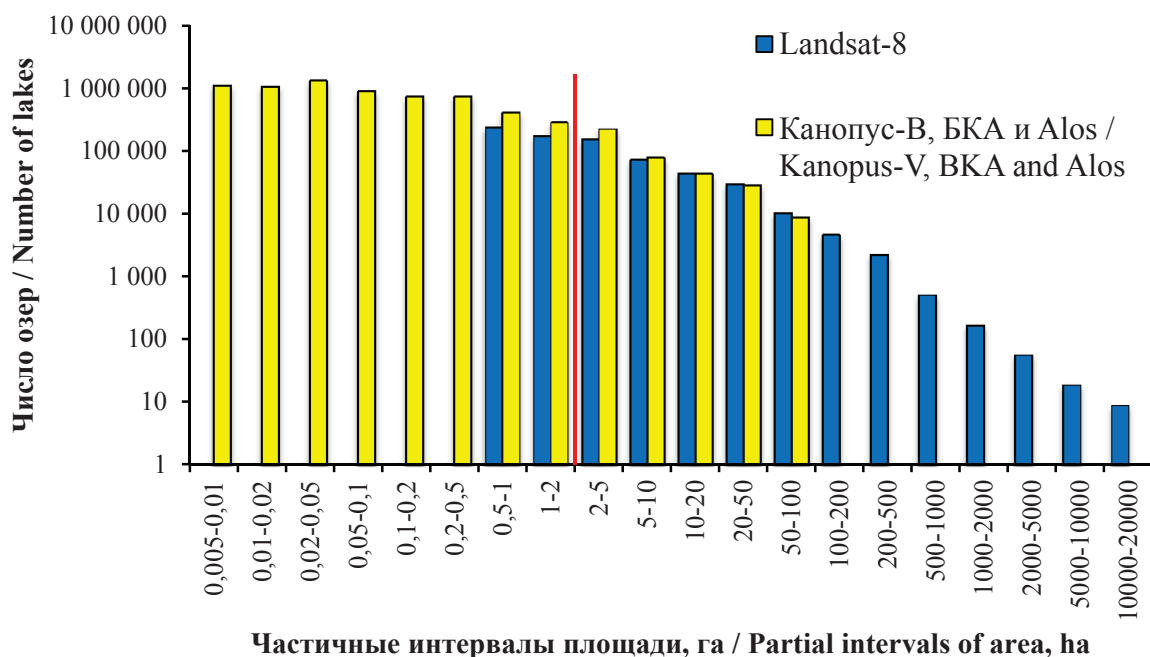


Рис. 1. Совмещение графиков двух исходных гистограмм с их перекрытием в диапазоне площадей озер 0,5–100 га

Fig. 1. Combining graphs of two initial histograms with their overlapping in the range of lakes areas of 0,5–100 ha

В качестве второй исходной гистограммы распределения площадей озер сравнительно малых размеров, полученной на 2-м этапе, использована обобщенная гистограмма распределения озер, построенная на основе данных о числе озер со снимков ВР по методике [11], предполагающей распространение (экстраполяцию) данных о числе и площадях озер, определенных на ограниченной совокупности тестовых участков, на всю территорию исследований. Распределяя расчетное число озер на исследуемой территории, найденное на основе экстраполяции данных со снимков ВР, по интервалам площадей, получим искомую вторую исходную гистограмму распределения озер по их площадям, которая отображается на рис. 1 желтыми столбиками в диапазоне изменения площадей от 0,005 до 20 га.

Согласно [11], коллекция космических снимков ВР, использованная на втором этапе, наряду со снимками Канопус-В и БКА, снятыми в короткие периоды 2013–2014 и 2014–2015 гг., включала и снимки Alos 2007–2008 гг. Так как общий период съемки снимков ВР составил 6–8 лет, можно предполагать, что за этот период на результаты дистанционных измерений площадей и числа озер могут оказать влияние изменения гидрологического и метеорологического состояния. Действительно, выполненные исследования, например [13, 15], показывают, что наблюдающиеся изменения водности на территории озерно-термокарстовых равнин сопровождаются изменениями термокарстовых озер, проявляющимися как в уменьшении, так и в увеличении их площади и количества.

Так как исследования законов распределения озер предполагают использование гистограмм распределения озер, основанных на статистическом анализе больших объемов выборочных данных по численности и площадям озер, то для обоснования возможности использования снимков, полученных в большом временном интервале, необходимо пользоваться статистически усредненными данными. По данным [15], установлено, что за период с 1970-х гг. сокращение числа и площадей озер составило в среднем по обширной территории криолитозоны России 0,5 и 2,9 % соответственно, а их увеличение – 0,5 и 1,2 % соответственно. Следовательно, влияние изменения гидрологических, метеорологических и других факторов на территории криолитозоны на численность и площади озер, в среднем за длительный период не превышающее первых единиц процентов, можно признать незначительным. Это может служить обоснованием возможности использования в исследованиях распределения озер снимков в большом временном интервале, в частности снимков Alos 2007–2008 гг.

На 3-м этапе производится синтез (объединение) двух исходных гистограмм, построенных на двух предыдущих этапах, в результате чего создается единая (синтезированная) гистограмма ра-

спределения площадей озер в очень широком диапазоне их размеров, что иллюстрирует график на рис. 1. Представленные на рисунке разными цветами исходные гистограммы распределения озер по площадям имеют область перекрытия (наложения) шириной в 7 интервалов, расположенных в диапазоне площадей 0,5–100 га.

Согласно [16], практически приемлемая погрешность дистанционного измерения площади озер по снимкам СР достигается при размерах озер 2 га ($2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$) и более. Поэтому синтезированная гистограмма может быть получена на основе «сшивания» двух исходных гистограмм в точке, соответствующей значению площади 2 га и отмеченной на графике рис. 1 вертикальным отрезком прямой линии (показано красным цветом). Полученная в результате такого «сшивания» синтезированная единая гистограмма определяется в очень широком диапазоне изменения площадей озер от 50 м² до 20000 га, при этом в интервалах площадей гистограммы менее 2 га используются данные по снимкам ВР, а в интервалах более 2 га – данные по снимкам СР. В табличном виде эта гистограмма приведена в таблице (5-й столбец). Здесь относительная частота озер w_i рассчитывалась как отношение числа озер в каждом частичном интервале к их общему числу во всех интервалах, равному 6963092. Эта таблица является основой для установления вида закона распределения озер по площадям.

Таблица. Распределение озер по интервалам их площадей
Table. Distribution of lakes by intervals of their areas

Интервал площадей озер, га Interval of lakes area, ha	Ширина интервала, м ² Width of interval, m ²	Число озер, s_i Number of lakes, s_i	Общая площадь, га Total area, ha	Относительная частота w_i , % Relative frequency w_i , %
0,005–0,01	100	1111990	7913,243	16,0
0,01–0,02	200	1064679	15207,12	15,3
0,02–0,05	500	1308978	42237,25	18,8
0,05–0,1	10 ³	895037	63775,48	12,9
0,1–0,2	2·10 ³	740641	105310,2	10,6
0,2–0,5	5·10 ³	752136	240198	10,8
0,5–1	10 ⁴	411521	291722,7	5,9
1–2	2·10 ⁴	284592	399414,5	4,1
2–5	5·10 ⁴	223729	686689,2	3,2
5–10	10 ⁵	78166	544469,6	1,1
10–20	2·10 ⁵	43560	610225,5	0,6
20–50	5·10 ⁵	30081	926364,3	0,43
50–100	10 ⁶	10354	717571,4	0,14
100–200	2·10 ⁶	4636	638174,6	0,07
200–500	5·10 ⁶	2227	666245,2	0,03
500–1000	10 ⁷	511	352498,5	0,007
1000–2000	2·10 ⁷	169	233803,1	0,002
2000–5000	5·10 ⁷	57	162679,6	0,0008
5000–10000	10 ⁸	19	125671,2	0,0003
10000–20000	2·10 ⁸	9	123066,3	0,0001
итого/total	–	6 963 092	6 953 237	100

Определение вида закона распределения площадей озер в широком диапазоне изменения их размеров

Используемый достаточно широко для оценки запасов метана и углекислого газа в озерах степенной закон распределения озер по размерам основан на аппроксимации эмпирических гистограмм распределения площадей озер на всей планете, которые были получены в основном путем анализа картографических материалов с частичным привлечением спутниковых снимков низкого и среднего разрешения [1–3], что позволило учитывать озера сравнительно больших размеров. На основе Глобальной базы данных [3] по водным объектам мира, собранной на основе мозаики космических снимков Landsat (разрешение 30 м) на всю территорию суши Земли, в [17] были построены две гистограммы распределения озер по их размерам: первая – на территории планеты (общемировая) и вторая – на территории Швеции. Эти гистограммы в виде сглаженных графиков, полученных путем усреднения исходных графиков из [17], приведены на рис. 2. Общемировая и шведская гистограммы, как видно на рис. 2, представляют распределение озер в интервалах от 1 га до приблизительно 10^5 и 10^2 км² соответственно. Как видно на рисунке, графики гистограмм достаточно удовлетворительно согласуются со степенным законом только при размерах озер более $5 \cdot 10^5$ – 10^6 м² (50–100 га), а при меньших размерах водоемов использование степенного закона будет давать завышенные оценки числа озер. Однако ни в цитированной [17], ни в других известных нам работах вопросы определения теоретического вида закона распределения озер по размерам, который соответствовал бы эмпирическим гистограммам, не рассматриваются. Более того, эти гистограммы не учитывают многочисленные озера с размерами менее 1 га, наиболее малые из которых, по данным [8], могут давать значительный вклад в объем запасов парниковых газов в термокарстовых озерах.

Изложенная выше методология построения гистограмм распределения озер на основе интеграции данных со спутниковых снимков различного разрешения позволила впервые получить гистограмму распределения площадей озер в очень широком интервале их размеров, учитывающую также и малые озера с размерами от 50 м². График гистограммы частот для территории Западной Сибири, представленный на рис. 2 (кривая 1), полученный на основе усреднения данных таблицы (столбец 3) о численности озер в частичных интервалах, демонстрирует сходный характер поведения с другими графиками на рис. 2. Однако визуальное сравнение углов наклона линий степенной аппроксимации трех гистограмм показывает, что угол наклона линии аппроксимации графика для Западной Сибири несколько больше, чем у соответствующих линий для общемировой и шведской гистограмм. Следовательно, западно-сибирский график, представляющий распределение термокарстовых озер криолитозоны, отображает больший

вклад малых озер в общую численность озер, что можно объяснить обнаруженным в [18] относительным ростом численности малых термокарстовых озер на обширной территории криолитозоны Западной Сибири в результате ускорения термокарстовых процессов в условиях современного потепления климата.

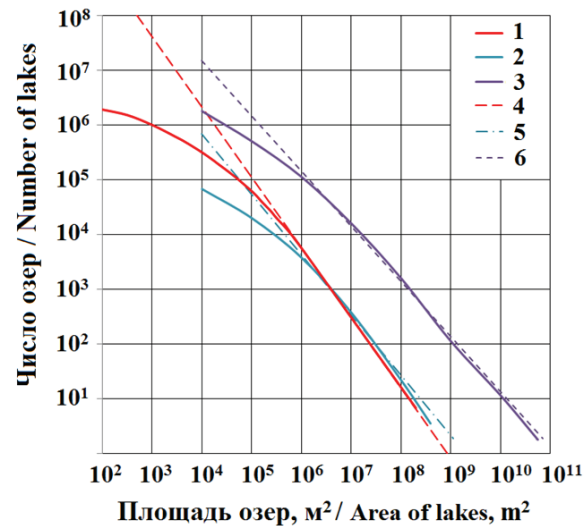


Рис. 2. Зависимость числа озер криолитозоны Западной Сибири от их площади (1) в сравнении с аналогичными зависимостями для Швеции (2) и для планеты в целом (3). Отрезки штрихпунктирной и пунктирных прямых обозначают линии степенной аппроксимации гистограмм: 4 – для Западной Сибири, 5 – для Швеции, 6 – общемировая

Fig. 2. Dependence of the number of lakes in the permafrost zone of Western Siberia on their area (1) in comparison with the same dependencies for Sweden (2), and for the planet as a whole (3). The segments of dot-dashed and dotted lines denote the lines of the power-law approximation of the histograms: 4 – for Western Siberia, 5 – for Sweden, 6 – for the world

Важнейшим достоинством и новизной полученной нами гистограммы для Западной Сибири является учет малых озер в интервале площадей 50 – 10^4 м², что позволяет изучить особенности распределения озер малых размеров. Как видно из рис. 2, в этом диапазоне размеров наблюдается значительно большее отклонение от степенного закона, что может проявляться в виде завышения численности озер, например, в интервале площадей 200 – 500 м² приблизительно на 2 порядка. Сходный характер гистограмм на рис. 2 позволяет на качественном уровне предсказать, что распределение размеров озер в области малых озер как в других регионах, так и в планетарном масштабе будет еще более значительно расходиться со степенным законом. В частности, оценки запасов метана и углекислого газа в малых озерах планеты при обычно используемом для этих целей степенном законе их распределения по размерам будут значительно завышенными. Иллюстрацией завышения численности малых озер (и соответственно объемов эмиссии метана) является работа [19], в

которой для расчета числа малых озер ввиду отсутствия экспериментальных данных был использован степенной закон распределения их размеров.

Оценим ошибки определения числа озер, относимых к тем или иным интервалам площади озер. В связи с этим проведем сравнительный анализ полученных нами данных о числе озер по снимкам высокого и среднего разрешения в интервалах области перекрытия (рис. 1). Используя данные о числе озер, полученные по снимкам разного разрешения в 7 интервалах области перекрытия (от 0,5 до 100 га), найдем в каждом из перекрывающихся интервалов относительную величину разности числа озер по снимкам ВР и СР, при этом число озер, найденное по СР-снимкам, выбирается в нашем случае в качестве эталонного вследствие того, что оно определяется по мозаике снимков на всей исследуемой территории.

В качестве оценки ошибки определения числа озер, относимой к тем или иным интервалам эмпирической гистограммы распределения озер, можно использовать среднее (по 7 интервалам) значение относительной разности числа озер, которое в нашем случае составляет 24,8 %. Учитывая, что использование на практике степенного закона распределения озер приводит, согласно рис. 2, к завышению численности озер в области их малых размеров на 1–2 и более порядков, полученная нами оценка погрешности может рассматриваться как практически приемлемая при построении гистограмм для определения вида и параметров логнормального закона распределения, так как она в десятки/сотни раз меньше ошибок в числе малых озер, возникающих при расчете по степенному закону.

В связи с изложенным важной задачей является определение теоретического вида закона распределения озер по размерам, наиболее адекватного эмпирическим гистограммам распределения озер, учитывающим малые озера. Согласно [20, 21], в математической статистике применяются два подхода к решению этой задачи: использование теоретического закона распределения, полученного в теории изучаемого объекта, либо перебор известных законов распределения с целью выявления наиболее соответствующего экспериментальным данным вида закона распределения с помощью математического аппарата проверки статистических гипотез, например, с применением программы Excel.

В рамках первого подхода к выбору вида закона распределения размеров озер обратимся к результатам теоретического изучения механизмов формирования и развития очагов термокарста в озерно-термокарстовых равнинах криолитозоны, выполненного А.С. Викторовым [12]. Для различных условий развития термокарста им были теоретически получены разные виды законов распределения площадей термокарстовых озер: логарифмический, равномерный, нормальный и логнормальный законы. В экспериментальных исследованиях

[5, 22] на различных участках криолитозоны, расположенных в разных геокриологических и физико-географических условиях, было установлено, что в большинстве случаев логнормальный закон распределения озер дает лучшее соответствие эмпирическим данным. Ниже приводятся результаты проверки соответствия полученной нами гистограммы распределения озер криолитозоны Западной Сибири логнормальному закону.

Согласно [20], плотность вероятности для логнормального закона распределения площади озер (s) определяется уравнением:

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

где μ – математическое ожидание; σ – среднеквадратическое отклонение.

В нашем случае оценки математического ожидания (M) и дисперсии (D) для логнормального распределения площадей озер Западной Сибири могут быть получены из выборочных данных в виде:

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

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

где m – число частичных интервалов; i – номер интервала.

Определим параметры логнормального распределения площадей озер криолитозоны Западной Сибири по эмпирическим данным. Используя полученные данные о численности и площадях озер в широком диапазоне их размеров (таблица) и учитывая, что $m=20$, по формулам (1) и (2) найдем: $M=6,88$ и $D=3,24$. Соответствие эмпирически полученного (синтезированного по снимкам различного пространственного разрешения) распределения озер теоретическому логнормальному закону было определено с помощью стандартной процедуры проверки статистических гипотез о виде закона распределения [20, 21]. Выполненная с помощью программного пакета Excel проверка соответствия эмпирического и теоретического распределений с использованием критерия Пирсона показала, что синтезированная гистограмма распределения площадей озер криолитозоны Западной Сибири, полученная в широком диапазоне их размеров и учитывающая малые озера, соответствует логнормальному закону с вероятностью 0,99.

Заключение

Рассмотрены вопросы исследования распределения площадей термокарстовых озер в очень широком диапазоне размеров озер в зоне многолетней мерзлоты на основе совместного использования космических снимков различного пространственного разрешения. Для проведения исследований в работе использованы спутниковые снимки среднего (Landsat-8) и высокого (Канопус-В, БКА, Alos)

разрешения. Обработка снимков проведена в автоматическом режиме с использованием средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3. В процессе обработки определялись число и площади термокарстовых озер. Были получены две гистограммы распределения озер различных размеров: первая – с использованием мозаики космических снимков среднего разрешения, вторая – с использованием экстраполяции данных о числе и площадях озер, определяемых на отдельных тестовых участках по снимкам высокого разрешения, на всю территорию исследований. На основе синтеза («сшивания») двух исходных гистограмм была построена единая гистограмма распределения озер по снимкам разного пространственного разрешения, представляющая озера с площадями от 5 м² до 20000 га на территории криолитозоны Западной Сибири.

Показано, что полученная эмпирическим путем единая гистограмма распределения площадей озер соответствует теоретическому логнормально-

му закону. Проведена проверка соответствия этого закона эмпирической гистограмме. Результаты этой проверки показали, что логнормальный закон соответствует экспериментальным данным, согласно критерию Пирсона, на уровне значимости 0,99. Это позволяет использовать логнормальный закон распределения озер по площадям для моделирования полей термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири и в других задачах.

Заметим, что учета влияния климатических факторов на полученные по спутниковым снимкам данные о площадях и численности озер не проводилось. Поэтому авторы исходят из допущения о том, что выбранные для анализа данные и определенные по ним значения параметров логнормального закона являются показательными для данного региона.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lehner B., Doll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // *J. Hydrol.* – 2004. – V. 296. – P. 1–22.
2. Downing J.A., Prairie Y.T. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments // *Limnol. Oceanogr.* – 2006. – V. 51. – P. 2388–2397.
3. A global inventory of lakes based on high resolution satellite imagery / C. Verpoorter, T. Kutser, D.A. Seekel, L.J. Tranvik // *Geophys. Res. Lett.* – 2014. – V. 41. – P. 1–7.
4. Seekell D.A., Carpenter S.R., Pace M.L. Conditional heteroscedasticity as a leading indicator of ecological regime shifts // *Am. Nat.* – 2011. – V. 178. – P. 442–451.
5. Анализ развития морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин на основе математической модели / А.С. Викторов, В.Н. Капралова, Т.В. Орлов, О.Н. Трапезникова, М.В. Архипова, П.В. Березин, В. Зверев, Е.Н. Панченко, С.А. Садков // *Геомофология.* – 2015. – № 3. – С. 3–13.
6. Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia // *Remote sensing.* – 2014. – № 6. – P. 621–636.
7. Polishchuk V.Y., Polishchuk Y.M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6 // In: *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems* / Ed. by O. Pokrovsky. – NY: Nova Science Publ., 2014. – P. 205–234.
8. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia / O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, S. Audry, J. Viers, B. Dupre // *Bio-geosciences.* – 2011. – V. 8. – P. 565–583.
9. Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озерах в зоне мерзлоты Западной Сибири / Ю.М. Полищук, В.Ю. Полищук, Н.А. Брыксина, О.С. Покровский, С.Н. Кирпотин, Л.С. Широкова // *Известия Томского политехнического университета.* – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 127–135.
10. Полищук Ю.М., Богданов А.Н., Муратов И.Н. 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.
11. Обобщенное распределение площадей малых озер в криолитозоне Западной Сибири по космическим снимкам высокого разрешения / Ю.М. Полищук, А.Н. Богданов, И.Н. Муратов, В.Ю. Полищук // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2016. – Т. 327. – № 10. – С. 13–21.
12. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. – М.: Наука, 2006. – 252 с.
13. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // *Криосфера Земли.* – 2009. – Т. 13. – № 2. – С. 16–26.
14. 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.
15. Кравцова В.И., Родионова Т.В. Исследование динамики площади и количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам // *Криосфера Земли.* – 2016. – Т. 20. – № 1. – С. 81–89.
16. Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Исследование точности дистанционного измерения площадей озер с использованием космических снимков // *Геоинформатика.* – 2013. – № 1. – С. 64–68.
17. Cael B.B., Seekell D.A. The size-distribution of Earth's lakes. *Scientific Reports.* – 2016. – № 6. – Article number 29633.
18. 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. – № 2. – P. 100–105.
19. 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.
20. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.
21. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.
22. 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.

Поступила 26.10.2017 г.

Информация об авторах

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

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

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

UDC 551.345:528.88

LAKE SIZE-DISTRIBUTION IN CRYOLITHOZONE BASED ON SATELLITE IMAGES OF MEDIUM AND HIGH RESOLUTION

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

Alexander N. Bogdanov¹,
albo06@yandex.ru

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

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

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

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

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

Relevance of the research is caused by the need to determine the kind of law of lake size-distribution for modeling and predicting the dynamics of thermokarst lakes fields and methane reserves in them in vast areas of the Arctic and subarctic zones in Siberia and other regions of the world.

The main aim of the research is to determine the kind of law of thermokarst lake size-distribution in the cryolithozone of Western Siberia in a wide range of their sizes on the basis of a synthesized histogram of lake distributions obtained from medium and high-resolution space images.

Methods: remote methods of studying the fields of thermokarst lakes using satellite imagery; method of test (key) sites; method for determining zones of active thermokarst from satellite imagery; methods of geoinformation systems for spatial analysis of data on thermokarst lakes derived from satellite imagery; statistical methods in determining the kind of distribution law of random variables from empirical data using the Pearson criterion.

Results. The paper considers briefly the methodological issues of synthesizing two histograms of the lake size-distribution, one of which is obtained from mid-resolution space images, another one – from high-resolution imagery on a limited set of test sites in the study area. The authors have used the images of the average resolution of LandSat-8 and high-resolution images of Canopus-V, BKA and Alos to construct histograms. Remote studies on high resolution images were carried out on 66 test sites, located fairly evenly in the territory of the cryolithozone of Western Siberia. As a result, the authors obtained the synthesized histogram of lake size-distribution in a very wide range of their sizes from 50 m² to 20000 hectares. Statistical analysis showed that the empirical distribution of lakes by area, according to the Pearson criterion, corresponds to the lognormal distribution law. The authors determined the parameters of the lognormal law of lake areas distribution by empirical data.

Key words:

Permafrost, geoinformation systems, space images, histograms of lake size-distribution, lognormal distribution law.

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

REFERENCES

1. Lehner B., Doll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *J. Hydrol.*, 2004, no. 296, pp. 1–22.
2. 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.
3. Verpoorter C., Kutser T., Seekel D.A., Tranvik L.J. A global inventory of lakes based on high resolution satellite imagery. *Geophys. Res. Lett.*, 2014, no. 41, pp. 1–7.
4. Seekell D.A., Carpenter S.R., Pace M.L. Conditional heteroscedasticity as a leading indicator of ecological regime shifts. *Am. Nat.*, 2011, no. 178, pp. 442–451.
5. Viktorov A.S., Kapralova V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Arkhipova M.V., Berezin P.V., Zverev A.V., Panchenko E.N., Sadkov S.A. Analyses of development of morphological structure of lake-thermokarst planes based on the mathematical model. *Geomorphology*, 2015, no. 3, pp. 3–13. In Rus.
6. Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia. *Remote sensing*, 2014, no. 6, pp. 621–636.
7. Polishchuk V.Y., Polishchuk Y.M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6. *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems*. Ed. by O. Pokrovsky. NY, Nova Science Publ., 2014. pp. 205–234.
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 Yu.M., Polishchuk V.Yu., Bryksina N.A., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S. Methodological issues of the assessment of methane reserves in small thermokarst lakes in the permafrost of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 127–135. In Rus.
10. Polishchuk Yu.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N. Methodological issues of construction of generalized histogram of the lake size-distribution in the permafrost based on satellite images of medium and high resolution. *Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*, 2016, vol. 13, no. 6, pp. 224–232. In Rus.
11. Polishchuk Yu.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Polishchuk V.Yu. Generalized size-distribution of small lakes in the permafrost of Western Siberia based on satellite images of high resolution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 10, pp. 13–21. In Rus.
12. Viktorov A.S. *Glavnye problemy matematicheskoy morfologii lanshafta* [Main problems of mathematic morphology of landscape]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 252 p.
13. Kravtsova V.I., Bystrova A.G., Resizing thermokarst lakes in different regions of Russia for the last 30 years. *Cryosphere of Earth*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 16–26. In Rus.
14. Polishchuk Yu.M., Bogdanov A.N. Active thermokarst zones within the permafrost and their detection by satellite images. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 12, pp. 104–114. In Rus.
15. Kravtsova V.I., Rodionova T.V. Investigation of the dynamics of the area and the number of thermokarst lakes in various regions of Russia's cryolithozone on space images. *Cryosphere of Earth*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 81–89. In Rus.
16. Bryksina N.A., Polishchuk Y.M. Investigation of accuracy of distance measurement of area lakes using satellite images. *Geoinformatics*, 2013, no. 1, pp. 64–68. In Rus.
17. Cael B.B., Seekell D.A. The size-distribution of Earth's lakes. *Scientific Reports*, 2016, no. 6, article number 29633.
18. 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, vol. 19, no. 2, pp. 100–105.
19. 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.
20. Kremer N.S. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, UNITY-DANA, 2004. 573 p.
21. Wentzel E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya* [Theory of Probability and its engineering applications]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 480 p.
22. Viktorov A.S., Kapralova V.N., Trapeznikova O.N. Mathematical model of the morphological structure of thermokarst lake and plains in changing climatic conditions. *Cryosphere of Earth*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 26–34. In Rus.

Received: 26 October 2017.

Information about the authors

Yury M. Polishchuk, Dr. Sc., professor, principal researcher, Ugra Research Institute of Information Technology; professor, principal researcher, Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS.

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

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