Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 2, с. 80–87 **http://www.izdatgeo.ru**

УДК 528.8:551.34 DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(80-87)

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ ОЗЕР ПО РАЗМЕРАМ В ПРЕРЫВИСТОЙ КРИОЛИТОЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО СНИМКАМ КАНОПУС-В

Ю.М. Полищук[1,2], А.Н. Богданов[2], И.Н. Муратов[2], В.Ю. Полищук[3,4]

[1]*Институт химии нефти СО РАН, 634021, Томск, пр. Академический, 4, Россия*
[2]*Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, 628011, Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151, Россия*
[3]*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634021, Томск, пр. Академический, 10/3, Россия*
[4]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634004, Томск, пр. Ленина, 30, Россия; yupolishchuk@gmail.com*

Представлены результаты дистанционного исследования распределения малых термокарстовых озер по площадям с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения (2 м), полученных с аппарата Канопус-В в летние месяцы 2013–2014 гг. Исследования проведены на 18 тестовых участках, выбранных в зоне прерывистого распространения многолетней мерзлоты Западной Сибири. По результатам дешифрирования спутниковых снимков на каждом тестовом участке определены количество озер, их площади и степень заозеренности территории. Показано, что на исследованных участках прерывистой криолитозоны распределение малых озер по их размерам подчиняется степенному закону.

Вечная мерзлота, космические снимки, климатические изменения, эмиссия метана, малые термокарстовые озера, Западная Сибирь

A CANOPUS-V IMAGERY-BASED STUDY OF THE SIZE-DISTRIBUTION OF SMALL LAKES IN THE DISCONTINUOUS PERMAFROST ZONE OF WESTERN SIBERIA

Yu.M. Polishchuk[1,2], A.N. Bogdanov[2], I.N. Muratov[2], V.Yu. Polischuk[3,4]

[1]*Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS, 4, Academicheskiy ave., Tomsk, 634021, Russia*
[2]*Ugra Research Institute of Information Technologies, 151, Mira str., Khanty-Mansiysk, 628011, Russia*
[3]*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS, 10/3, Academicheskiy ave., Tomsk, 634021, Russia*
[4]*National Research Tomsk Politechnic University, 30, Lenina ave., Tomsk, 634004, Russia; yupolishchuk@gmail.com*

The paper presents the results of the remote sensing studies of distributions of small thermokarst lakes' sizes using Canopus-V satellite images with high spatial resolution (2 m) obtained during the summer months of 2013–2014. In this research, a total of 18 test sites have been investigated within the area of discontinuous permafrost in Western Siberia. Results of the interpretation of satellite images have allowed determining the number of lakes, their areas, and limnicity of the territory for each test site. It has been determined that the size-distribution of small thermokarst lakes within the study area corresponds to a power law.

Permafrost, satellite imagery, climate changes, emission of methane, small thermokarst lakes, Western Siberia

ВВЕДЕНИЕ

Современное потепление климата в северных широтах планеты, вызывая увеличение глубины сезонного протаивания почвы, сопровождается снижением прочности многолетнемерзлых грунтов и нарушением объектов инфраструктуры. Более того, мерзлота, являясь хранилищем законсервированного углерода в обширных мерзлых торфяных болотах Северной Евразии и в некоторых частях Северной Америки, при потеплении климата может стать источником еще большего потепления при высвобождении парниковых газов [*Zimov et al., 1997*].

Углекислый газ и метан – одни из наиболее важных парниковых газов. Принято считать, что углекислый газ в глобальном масштабе обеспечивает более половины вклада в парниковый эффект. Несмотря на значительно меньшую концентрацию в атмосфере, метан по величине прямого потенциала потепления климата многократно превышает действие углекислого газа [*Кароль, 1996*]. В качестве основных природных источников эмиссии углекислого газа и метана на северных территориях рассматриваются болота и переувлажненные ландшафты, озерно-термокарстовые равнины, подводные метангидраты шельфовых морей и крупных водоемов в зоне многолетней мерзлоты и др. [*Walter et al., 2007; Bastviken et al., 2008; Juutinen et al., 2009; Sabrekov et al., 2014*]. По оценкам [*Жи-*

© Ю.М. Полищук, А.Н. Богданов, И.Н. Муратов, В.Ю. Полищук, 2017

либа и др., 2011], четверть мирового объема природного метана сосредоточена в Западной Сибири, значительную часть территории которой занимают своеобразные мерзлотные болотисто-озерные ландшафты с бесчисленным множеством озер разных размеров и возраста. Несмотря на то что озера составляют лишь малую часть земной поверхности, они являются местами интенсивной биогеохимической активности и в результате этого служат мощным источником эмиссии метана в атмосферу.

Согласно [*Pokrovsky et al., 2011; Shirokova et al., 2013*], наиболее активные источники эмиссии метана в зоне мерзлоты – это малые термокарстовые озера с площадью менее 0.05–0.1 га. Из-за своих малых размеров такие озера, как правило, не учитываются в прогнозных оценках вклада метана в общий парниковый эффект. В этих условиях получение обоснованных прогнозов изменения объемов эмиссии метана из малых термокарстовых озер в зоне вечной мерзлоты под действием климатических изменений является важной задачей, решение которой должно быть основано на использовании экспериментальных данных о распределении термокарстовых озер по их размерам. Получение таких данных для территории Западной Сибири ввиду ее труднодоступности и высокой степени заболоченности мерзлотно-тундровых ландшафтов невозможно без применения методов дистанционного зондирования.

В настоящее время в дистанционных исследованиях полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты используются преимущественно снимки среднего разрешения Landsat, не позволяющие, однако, дешифрировать и надежно определять площади озер с размерами менее 0.5–1 га. В связи с этим целью настоящей работы было исследование распределения малых термокарстовых озер в прерывистой криолитозоне Западной Сибири с применением снимков высокого разрешения Канопус-В.

АНАЛИЗ ОПЫТА ДИСТАНЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗЕР ПО РАЗМЕРАМ

В настоящее время численность и пространственное распределение озер изучаются на глобальном и региональном уровнях. Полученные в этих исследованиях данные необходимы для оценки объемов эмиссии метана. Изучению общей численности и распределения озер по площадям на глобальном уровне посвящены работы [*Lehner, Doll, 2004; Downing, Prairie, 2006; Seekell, Pace, 2011; Verpoorter et al., 2014*]. В наиболее часто используемой для оценки эмиссии метана базе данных по озерам и другим водным объектам [*Lehner, Doll, 2004*], основанной на картографических материалах, не учитываются озера площадью менее 10 км^2. Применяемая для учета водных объектов меньших размеров статистическая экстраполяция степенного закона распределения озер по площадям, обнаруженного в этих исследованиях, приводит, как показано в [*Downing, Prairie, 2006; Seekell, Pace, 2011*], к завышению численности и, следовательно, объемов эмиссии метана. Это потребовало в последние годы привлечения спутниковых снимков для изучения числа и распределения озер по размерам.

В [*Verpoorter et al., 2014*] представлены результаты исследований распределения озер, выполненные с использованием спутниковых снимков среднего разрешения Landsat-7, полученных за период 1997–2003 гг., которые показали, что распределение озер по площадям соответствует степенному закону. Эти исследования позволили сформировать глобальную базу данных о водных объектах на территории планеты, включающую все озера площадью более 2000 м^2 (0.2 га). Общее число таких озер составило 117 млн, с суммарной площадью водной поверхности около $5{\cdot}10^6$ км^2, что соответствует 3.7 % поверхности суши, не покрытой ледниками. Большие и средние по размерам озера доминируют по величине суммарной площади озер. Численность сравнительно небольших озер площадью 0.2–1 га составляет более 80 % их общего числа в базе данных, а их суммарная площадь доходит до 0.25 млн км^2, что составляет всего лишь 0.27 % общей площади всех озер. Однако численность малых озер с размерами менее 0.2 га, их общая площадь и распределение по размерам не изучены.

Исследования термокарстовых озер в зоне мерзлоты, проводившиеся в региональном масштабе (на Аляске, в Скандинавии и Сибири), в основном были направлены на изучение изменений их размеров [*Кравцова, Быстрова, 2009; Smith et al., 2005; Kirpotin et al., 2009; Polishchuk et al., 2014*]. Работы по дистанционному исследованию численности и распределения озер по размерам в региональном масштабе относятся главным образом к территории Сибири и выполнены с использованием снимков среднего разрешения Landsat, Ресурс-О и др. [*Полищук В.Ю., Полищук Ю.М., 2013; Брыксина, Полищук, 2015; Karlsson et al., 2014; Polishchuk V., Polishchuk Y., 2014*].

Изучению малых озер (с площадями менее 0.2–0.5 га) в региональном масштабе посвящены немногочисленные работы, в частности [*Полищук и др., 2015а,б; Grosse et al., 2008*]. В статье [*Grosse et al., 2008*] рассматриваются результаты исследований на трех участках в зоне сплошной мерзлоты Восточной Сибири с использованием космических снимков высокого (Spot-5) и сверхвысокого разрешения (Ikonos-2), которые позволили выделить малые озера с минимальными площадями 30 м^2 на двух участках и 100 м^2 на третьем участке.

Несмотря на сравнительно малую площадь исследованных участков (около 54 тыс. га), было определено достаточно большое общее число озер на них – 29 361, большинство из которых составили малые озера размерами до 0.02–0.05 га.

В [*Grosse et al., 2008*] представлены графики распределения числа озер по площадям для трех исследованных тестовых участков. По мнению авторов статьи, графики распределения озер по их размерам могут быть описаны степенным законом распределения. Однако выводы авторов о степенном виде законов распределения озер следует принимать как предварительные, поскольку сделаны они на основе визуального анализа немногочисленных графиков. Кроме того, рассмотренные в статье [*Grosse et al., 2008*] тестовые участки располагались вблизи береговой границы Северного Ледовитого океана, в связи с чем результаты этих исследований не могут в полной мере отражать закономерности распределения озер на обширной территории многолетней мерзлоты Сибири.

Более последовательное изучение распределений малых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири с использованием снимков сверхвысокого разрешения выполнено в [*Полищук и др., 2015а*]. Исследования проводились на восьми тестовых участках, выбранных в разных зонах мерзлоты Западной Сибири (в островной зоне – один участок, в прерывистой – два и в сплошной – пять). Площади озер определялись по космическим снимкам сверхвысокого разрешения, полученным со спутника QuickBird (разрешение 0.61 м). Анализ экспериментальных данных о численности и размерах термокарстовых озер показал, что гистограммы распределения озер по площадям допускают их аппроксимацию как степенными, так и экспоненциальными функциями (с достаточно высоким уровнем детерминации 0.95 и 0.90 соответственно), однако аппроксимирующая функция степенного вида дает более высокую достоверность. Заметим, что малое число тестовых участков в разных зонах мерзлоты не позволяет считать полученные результаты достаточно обоснованными, что требует проведения дополнительных исследований.

В работах [*Karlsson et al., 2014; Polishchuk V., Polishchuk Y., 2014*] представлены результаты изучения распределений озер по площадям на территории Западной Сибири по спутниковым снимкам среднего разрешения Landsat за период 1973–2014 гг. Исследования, проведенные на 29 тестовых участках, расположенных в зонах сплошного, прерывистого и островного распространения многолетней мерзлоты [*Polishchuk V., Polishchuk Y., 2014*], показали, что распределение озер по площадям, согласно критерию Пирсона, удовлетворяет экспоненциальному закону. А в статье [*Karlsson et al., 2014*], посвященной дистанционному изучению изменений площади термокарстовых озер и их числа в зоне прерывистой мерзлоты Западной Сибири, отмечается, что, по мнению авторов, распределение озер по площадям соответствует степенному закону. Заметим, что теоретическим путем в [*Викторов и др., 2015*] обосновано логнормальное распределение озер по размерам в озерно-термокарстовых равнинах.

Противоречивость выводов о виде законов распределения озер, по нашему мнению, отражает недостаточную изученность вопроса о распределении термокарстовых озер по их размерам в региональном масштабе. Особенно это относится к слабоизученным малым озерам. Проведение дистанционных исследований распределения малых термокарстовых озер в зоне прерывистой мерзлоты требует применения космических снимков высокого пространственного разрешения.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ ОЗЕР ПО РАЗМЕРАМ

Исследования проводились на территории зоны прерывистого распространения многолетней мерзлоты Западной Сибири с использованием космических снимков высокого разрешения Канопус-В (разрешение 2 м), коллекция которых включала 13 снимков. Выбор тестовых участков (ТУ) для исследований по снимкам Канопус-В производился в границах сцен космических снимков в местах активного термокарста [*Викторов, 2006*], определяемого по наибольшему сгущению озер. Общая характеристика выбранных тестовых участков дана в табл. 1, а их расположение приведено на рис. 1.

Согласно [*Викторов, 2006*], образование термокарстовых озер происходит под воздействием нескольких факторов, главные из которых – наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород и равнинный характер территории. Поэтому большинство исследователей озерных термокарстовых равнин исходят из предположения о том, что в районах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород криолитозоны распространены преимущественно озера термокарстового происхождения либо озера смешанного генезиса при значительном влиянии термокарстовых процессов. Например, в работе [*Кравцова, Быстрова, 2009*] на основе геоморфологического и климатического анализа вся криолитозона Западной Сибири отнесена к числу районов с повсеместным распространением термокарстовых озер. Поэтому озера, изучаемые в настоящей работе дистанционным методом, рассматриваются как термокарстовые озера.

Проверка равномерности распределения на исследуемой территории выбранных тестовых

Таблица 1. **Характеристика тестовых участков и даты съемки**

Номер ТУ	Широта, град	Долгота, град	Дата снимка	Площадь ТУ, га
1	64.04	70.56	29.06.2014	3233
2	64.31	70.93	17.07.2013	3187
3	64.85	74.05	23.06.2013	3321
4	64.21	74.54	23.06.2013	3050
5	63.50	76.18	09.07.2013	2816
6	64.05	78.16	30.06.2014	2986
7	64.60	79.36	29.07.2013	2807
8	65.15	82.38	05.07.2013	2981
9	65.96	83.18	14.08.2013	3270
10	65.56	80.00	20.06.2014	3311
11	65.44	79.05	03.08.2014	3421
12	65.96	76.73	30.06.2014	3294
13	65.69	72.93	18.07.2013	3100
14	64.84	69.37	22.07.2013	2969
15	65.58	68.63	22.07.2013	3174
16	65.42	66.87	07.06.2013	3155
17	65.69	67.31	03.08.2014	2882
18	66.25	72.46	18.07.2013	3167

участков производилась путем сопоставления схемы размещения ТУ с картами геокриологического и ландшафтного зонирования территории Западной Сибири [*Атлас..., 1984; Ландшафтная карта..., 1987*]. На рис. 1 представлена карта-схема расположения подзон многолетней мерзлоты Западной Сибири, на которой видно, что выбранные тестовые участки довольно равномерно распределены по территории исследований.

Все выбранные для проведения дистанционных исследований 13 безоблачных космических снимков Канопус-В получены в 2013–2014 гг. в сравнительно короткий период – менее двух месяцев (конец июня–начало августа, когда полностью исчезает ледовый покров озер, мешающий выделению озер при дешифрировании снимков). Фрагмент снимка территории ТУ-7, демонстрирующий поле озер различных размеров и с разнообразными очертаниями их береговых линий, представлен на рис. 2.

Обработка космических снимков выполнена с использованием стандартных средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3. Для обеспечения приемлемой точности определения площадей озер минимальный размер регистрируемых озер зада-

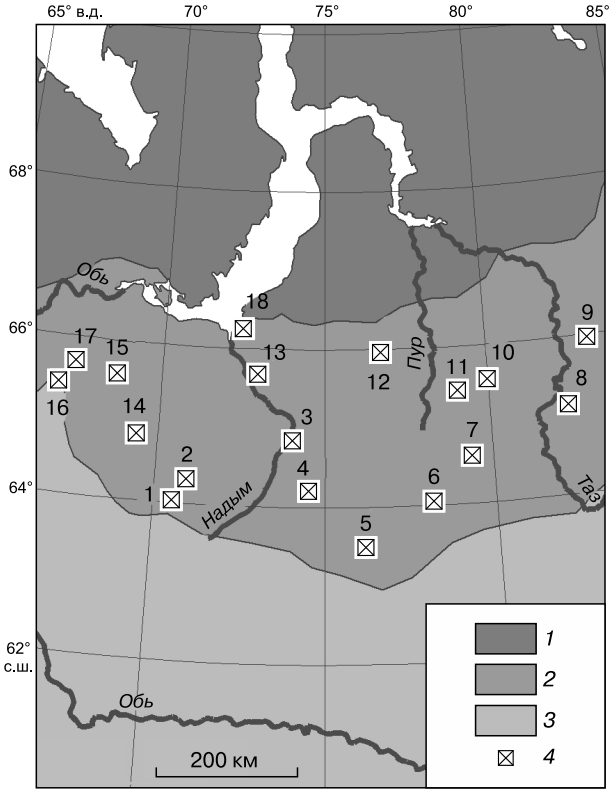

Рис. 1. Схема расположения тестовых участков в прерывистой криолитозоне Западной Сибири.

Мерзлота: *1* – сплошная, *2* – прерывистая, *3* – островная; *4* – тестовый участок.

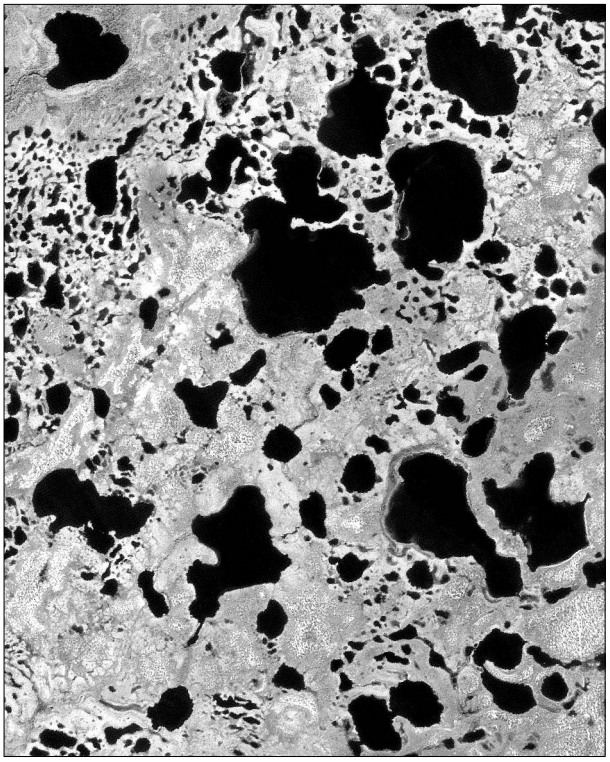

Рис. 2. Типичное изображение термокарстовых озер прерывистой криолитозоны на космическом снимке Канопус-В (29.07.2013) территории участка 7.

вался как полигон, в границах которого располагается 10 пиксел. Следовательно, при разрешении снимка 2 м размер пикселя составляет 4 м^2, что дает минимальный размер озера 40 м^2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ ОЗЕР ПО РАЗМЕРАМ

Общая характеристика полей термокарстовых озер на исследуемой территории по результатам определения числа озер и дистанционного измерения их площадей на разных тестовых участках по снимкам высокого разрешения Канопус-В дана в табл. 2. Общая площадь озер в табл. 2 определялась как суммарная площадь озер на каждом ТУ. Плотность озер рассчитывалась как отношение числа озер на тестовом участке к его площади. Заозеренность территории определялась в виде отношения суммарной площади озер к площади ТУ. Для общей характеристики полей озер на исследуемой территории в табл. 2 даны средние значения показателей, определенные по всем ТУ.

Как следует из табл. 2, размеры озер на разных тестовых участках изменяются в широких пределах – от 40 м^2 до нескольких сотен гектаров. Число озер на ТУ варьирует от нескольких сотен до десятков тысяч озер разных размеров. Заозеренность территории на тестовых участках изменяется от 7.5 до 40.1 % со средним значением 22.2 %. Еще большая изменчивость на разных ТУ характерна для плотности озер, диапазон изменения которой примерно в 2 раза превышает диапазон значений заозеренности (см. табл. 2).

Таблица 2. **Характеристики полей термокарстовых озер по снимкам Канопус-В на тестовых участках**

Номер ТУ	Количество озер	Макс. площадь озера, га	Общая площадь озер, га	Плотность озер, га$^{-1}$	Заозеренность, %
1	1470	170.0	810.13	0.45	25.1
2	1739	71.8	780.99	0.55	24.5
3	2547	44.5	1038.10	0.77	31.3
4	2082	100.8	1163.80	0.68	38.2
5	1120	49.4	658.79	0.40	23.4
6	1965	62.5	1197.46	0.66	40.1
7	988	33.9	413.84	0.35	14.7
8	970	96.2	626.55	0.33	21.0
9	1200	209.0	1044.11	0.37	31.9
10	616	80.0	533.88	0.19	16.1
11	663	58.1	730.62	0.19	21.4
12	1553	143.6	758.63	0.47	23.0
13	1522	128.6	876.62	0.49	28.3
14	221	32.0	222.84	0.07	7.5
15	178	26.2	386.27	0.06	12.2
16	1200	70.6	484.81	0.38	15.4
17	450	23.1	381.54	0.16	13.2
18	750	36.3	376.19	0.24	11.9
Среднее	1179.6	79.8	693.6	0.38	22.2

Важным для оценки запасов метана и углекислого газа в малых термокарстовых озерах в зоне мерзлоты является знание закона распределения озер по их площадям. По данным дистанционного измерения площадей озер были построены гистограммы распределения термокарстовых озер для всех исследованных ТУ. На рис. 3 приведены гистограммы распределения озер по площадям на двух участках (ТУ-1 и ТУ-7), представленные в двойном логарифмическом масштабе. На рис. 3 относительное число озер, попадающих в каждый i-й интервал гистограммы, определялось как n_i/N, где n_i – число озер в каждом интервале гистограммы; i – номер интервала; N – суммарное количество озер на исследуемом тестовом участке. Как видно на рис. 3, для разных ТУ графики имеют сходный характер, отражающий рост числа озер при уменьшении их площади.

Графики гистограмм распределения озер по площадям на рис. 3 представлены в двойном логарифмическом масштабе с целью проверки соответствия эмпирических распределений степенному закону вида

$$k = AS^B, \qquad (1)$$

где k – относительное число озер в интервалах гистограмм; S – площадь водной поверхности озер; A, B – коэффициенты степенной функции.

Покажем, что в случае степенного вида закона распределения озер по площадям графики гистограмм эмпирического распределения озер в двойном логарифмическом масштабе будут представляться линейными функциями. Прологарифмиро-

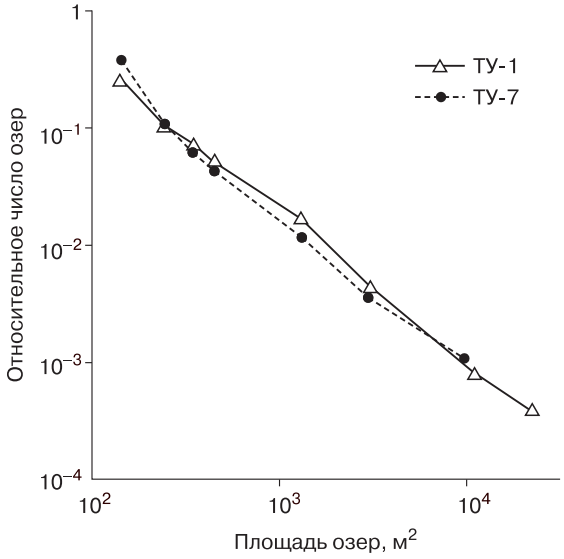

Рис. 3. Примеры гистограмм распределения озер по площадям на двух тестовых участках.

вав левую и правую части уравнения (1), получим соотношение

$$\lg k = \lg A + B \lg S,$$

которое путем введения подстановок $\lg k = y$ и $\lg S = x$ приводится к виду

$$y = \lg A + Bx. \qquad (2)$$

Уравнение (2) демонстрирует линейную зависимость логарифма относительного числа озер от логарифма величины их площадей на графиках гистограмм, представленных в двойном логарифмическом масштабе. Действительно, графики гистограмм распределения озер, представленные в таком масштабе на рис. 3, имеют приблизительно линейный вид.

Для подтверждения указанной линейной зависимости проведем аппроксимацию гистограмм уравнением прямой линии. На рис. 4 точками показаны значения относительного числа озер в интервалах гистограммы распределения озер по размерам на ТУ-7, а прямой линией – аппроксимирующая зависимость, полученная с высоким уровнем достоверности (коэффициент детерминации 0.98) в виде (2), что может служить подтверждением степенного закона распределения озер по площадям в виде (1). Из уравнения аппроксимации, приведенного на рис. 3, определим значения коэффициентов степенного закона распределения озер по площадям для ТУ-7: $A = 181$, $B = -1.3322$.

Аналогичная аппроксимация была проведена для эмпирических гистограмм распределения озер на всех ТУ. Рассчитанные значения коэффициентов степенного закона распределения озер для разных ТУ представлены в табл. 3. Из табл. 3 видно, что коэффициент B, определяющий вид степенной функции, изменяется на разных ТУ в достаточно небольшом интервале – от –1.62 до –0.95 (со средним значением –1.26), что является показателем относительного постоянства распределения озер по площадям на разных ТУ. Следовательно, несмотря на значительные колебания плотности озер и заозеренности территорий на

Таблица 3. **Значения коэффициентов степенного закона распределения озер по данным исследований на тестовых участках**

Номер ТУ	Коэффициенты степенного закона модели аппроксимации		R^2
	B	A	
1	–1.23	98.02	0.98
2	–1.62	1056.33	0.97
3	–1.28	137.28	1.00
4	–1.34	200.49	0.99
5	–1.16	62.60	0.99
6	–1.26	126.15	1.00
7	–1.33	181.05	0.98
8	–1.16	62.23	0.98
9	–1.25	84.51	0.92
10	–1.23	88.47	0.94
11	–1.08	32.88	0.94
12	–1.46	419.76	0.99
13	–1.30	152.16	0.98
14	–0.95	14.01	0.93
15	–1.03	23.53	0.94
16	–1.45	388.06	0.99
17	–1.15	53.13	0.96
18	–1.44	357.27	0.98

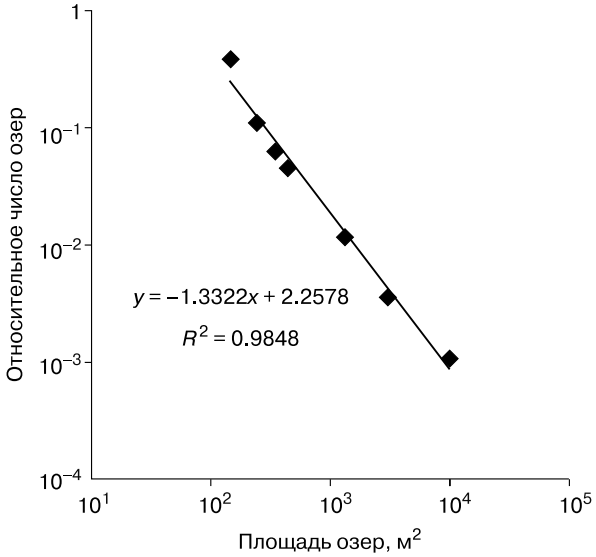

Рис. 4. Аппроксимация гистограммы распределения озер по площадям на ТУ-7, представленной в двойном логарифмическом масштабе.

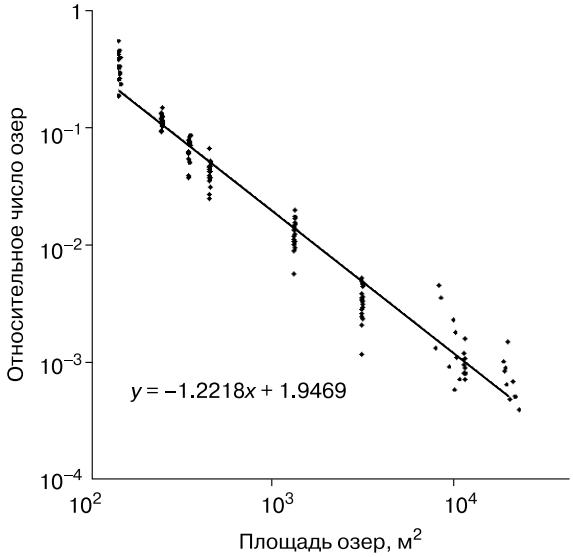

Рис. 5. Аппроксимация усредненной гистограммы распределения малых озер по площадям в прерывистой криолитозоне Западной Сибири.

разных ТУ (см. табл. 2), можно отметить сравнительно слабую изменчивость распределения озер на них. График семейства гистограмм распределения озер на разных ТУ, представленный на рис. 5, также демонстрирует близость гистограмм на каждом из ТУ к прямой линии, отображающей результат аппроксимации усредненной (по всем исследованным ТУ) гистограммы распределения малых озер по их площадям в прерывистой криолитозоне Западной Сибири.

Приведенные в табл. 3 значения коэффициента детерминации R^2 показывают высокую степень достоверности линейной аппроксимации гистограмм распределения озер, представленных в двойном логарифмическом масштабе, что является подтверждением степенного закона распределения малых озер по площадям. Проведенная проверка гипотезы о согласии эмпирических распределений теоретическому (степенному) закону распределения озер по площадям с использованием критерия Пирсона показала, что гипотеза подтверждается на уровне значимости 0.99 на всех тестовых участках. Подчеркнем, что выводы о степенном виде закона распределения малых термокарстовых озер, по данным наших исследований, справедливы для озер с площадями приблизительно от 40 м^2 до 1 га.

Заметим, что степенному закону подчиняются распределения озер в глобальном масштабе [*Downing, Prairie, 2006; Verpoorter et al., 2014*], что обсуждалось выше. Следовательно, приведенные в работе результаты дистанционных исследований полей термокарстовых озер по снимкам высокого разрешения показывают, что и в исследованиях регионального масштаба на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири распределение озер по размерам можно принимать соответствующим степенному закону.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложены результаты дистанционного исследования распределения малых термокарстовых озер прерывистой криолитозоны Западной Сибири, полученные по спутниковым снимкам высокого разрешения Канопус-В, позволившим дешифрировать озера малых размеров. Использовано 13 безоблачных снимков, полученных в летний период (конец июня–начало августа) 2013–2014 гг. Исследования проведены на 18 тестовых участках примерно одинаковых размеров, достаточно равномерно распределенных по территории.

По результатам дешифрирования спутниковых снимков на каждом из тестовых участков определены количество озер, их площади и степень заозеренности территории. Размеры озер на разных ТУ изменялись в широких пределах – от 40 м^2 до нескольких сотен гектаров. Число озер на исследованных участках варьирует от нескольких сотен до десятков тысяч озер разных размеров. Заозеренность территории на разных тестовых участках изменяется от 7.5 до 40.1 % со средним значением 22.2 %.

Построены графики гистограмм распределения озер по площадям на каждом из тестовых участков. С целью проверки соответствия эмпирических распределений степенному закону распределения и для удобства их графического изображения они представлены в двойном логарифмическом масштабе. Статистический анализ экспериментальных гистограмм распределения озер показал, что на всех исследованных участках в прерывистой криолитозоне Западной Сибири эмпирические гистограммы распределения озер по их площадям могут быть аппроксимированы степенной функцией. Показатель степени аппроксимирующей функции, определяющий вид степенного закона, изменяется на разных тестовых участках в небольшом интервале значений – от –1.62 до –0.95 (со средним значением –1.26), что является показателем сравнительного постоянства (слабой изменчивости) закона распределения озер по площадям на разных ТУ, несмотря на значительные колебания уровня заозеренности территорий на различных участках.

Работа выполнена по договору с Министерством образования и науки Российской Федерации № 14.B25.31.0001 от 24 июня 2013 г. (BIO-GEO-CLIM) и при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-01-31489, 15-45-00075).

Литература

Атлас СССР / Отв. ред. Т.П. Сидоренкова. М., ГУГК, 1984, 260 с.

Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 114–120.

Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта / А.С. Викторов. М., Наука, 2006, 252 с.

Викторов А.С., Капралова В.Н., Трапезникова О.Н. Математическая модель морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин в изменяющихся климатических условиях // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 26–34.

Жилиба А.И., Вандышева Г.А., Грибанов К.Г., Захаров В.И. Глобальные изменения климата: “метановая бомба” – наукообразный миф или потенциальный сценарий? // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата, 2011, т. 2, № 1 (3), EDCCrev0001.

Кароль И.Л. Оценки характеристик относительного вклада парниковых газов в глобальное потепление климата // Метеорология и гидрология, 1996, № 11, с. 5–12.

Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменения размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 2, с. 16–26.

Ландшафтная карта СССР / Под ред. И.С. Гудилина. М., МГУ, 1987 [Электрон. ресурс]. – URL: http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/data/landscapes/ (дата обращения: 15.06.2015).

Полищук В.Ю. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты / В.Ю. Полищук, Ю.М. Полищук. Ханты-Мансийск, УИП ЮГУ, 2013, 129 с.

Полищук Ю.М., Брыксина Н.А., Полищук В.Ю. Дистанционный анализ изменения числа и распределения по размерам малых термокарстовых озер криолитозоны Западной Сибири // Исслед. Земли из космоса, 2015а, № 3, с. 34–42.

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 озерах криолитозоны Западной Сибири // Изв. Том. политехн. ун-та, 2015б, т. 326, № 2, с. 127–135.

Bastviken D., Cole J.J., Pace M.L., Van der Bogert M.C. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budget and CH_4 emissions // J. Geophys. Res., 2008, vol. 113, G02024, DOI: 10.1029/2007JG000608.

Downing J.A., Prairie Y.T. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments // Limnol. Oceanogr., 2006, vol. 51, p. 2388–2397.

Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lantuit H., Zimov S. Distribution of Thermokarst Lakes and Ponds at Three Yedoma Sites in Siberia // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost (June 29–July 3, 2008). Fairbanks, Alaska, 2008, p. 551–556.

Juutinen S., Rantakari M., Kortelainen P., Huttunen J.T., Larmola T., Alm J., Sivola J., Martikainen P.J. Methane dynamics in different boreal lake types // Biogeosciences, 2009, No. 6, p. 209–223.

Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Nothwestern Siberia // Remote Sensing, 2014, No. 6, p. 621–636, DOI: 10.3390/rs6010621.

Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting // Intern. J. Environ. Studies, 2009, vol. 66, No. 4, p. 423–431.

Lehner B., Doll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // J. Hydrol., 2004, vol. 296, p. 1–22, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.028.

Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., Dupre B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia // Biogeosciences, 2011, vol. 8, p. 565–583, DOI: 10.5194/bg-8-565-2011.

Polishchuk V., Polishchuk Y. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Chapter 6 // Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems / O. Pokrovsky (ed.). N.Y., Nova Sci. Publ., 2014, p. 205–234, DOI: 10. 978-94-007-4569-8.

Polishchuk Y., Kirpotin S., Bryksina N. Remote study of thermokarst lakes dynamics in West-Siberian permafrost. Chapter 5 // Ibid., p. 173–204, DOI: 10. 978-94-007-4569-8.

Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Maksyutov S.S. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH_4 flux upscaling // Environ. Res. Lett., 2014, No. 9, p. 1–9, DOI: 10.1088/1748-9326/9/4/045008.

Seekell D.A., Pace M.L. Does the Pareto distribution adequately describe the size-distribution of lakes? // Limnol. Oceanogr., 2011, vol. 56, p. 350–356, DOI: 10.4319/lo.2011.56.1.0350.

Shirokova L.S., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Desmukh C., Pokrovsky B.G., Audry S., Viers J. Biogeochemistry of organic carbon, CO_2, CH_4, and trace elements in thermokarst water bodies in discontinuous permafrost zones of Western Siberia // Biogeochemistry, 2013, vol. 113, p. 573–593, DOI: 10.1007/s10533-012-9790-4.

Smith L., Sheng Y., Macdonald G., Hinzman L. Disappearing Arctic Lakes // Science, 2005, vol. 308, No. 3, p. 14.

Verpoorter C., Kutser T., Seekel D.A., Tranvik L.J. A global inventory of lakes based on high resolution satellite imagery // Geophys. Res. Lett., 2014, vol. 41, DOI: 10.1002/2014GL060641.

Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget // Phil. Trans. R. Soc., 2007, vol. 365, p. 1657–1676, DOI: 10.1098/rsta.2007.2036.

Zimov S.A., Voropaev Y.V., Semiletov I.P., Davidov S.P., Prosiannikov S.F., Chapin III F.S., Chapin M.C., Trumbore S., Tyler S. North Siberian lakes: a methane source fuelled by Pleistocene Carbon // Science, 1997, vol. 277, p. 800–802.

Поступила в редакцию
11 сентября 2015 г.