

## Исследование полей малых термокарстовых озер в зоне сплошной мерзлоты Западной Сибири по спутниковым снимкам высокого разрешения

Ю.М. Полищук<sup>1,2</sup>, И.Н. Муратов<sup>2</sup>, В.Ю. Полищук<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Институт химии нефти СО РАН  
634021, г. Томск, пр. Академический, 4

<sup>2</sup>Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий  
628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151

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

<sup>4</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634004, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 31.01.2016 г.

Представлены результаты дистанционного исследования малых термокарстовых озер с использованием космических снимков БКА и Alos, полученных в летние месяцы 2008–2014 гг. Исследования проведены на 16 тестовых участках в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты Западной Сибири. На каждом тестовом участке определены количество озер, их площади, плотность озер и степень заозеренности территории, и построены гистограммы распределения озер по размерам. Показано соответствие эмпирических гистограмм распределения озер по их площадям степенному закону.

*Ключевые слова:* вечная мерзлота, космические снимки, малые термокарстовые озера, Западная Сибирь; permafrost, space images, small thermokarst lakes, Western Siberia.

### Введение

В настоящее время проводятся обширные исследования эмиссии парниковых газов в атмосферу из водных объектов в болотно-озерных ландшафтах. Глобальное потепление климата, наиболее явно проявляющееся в последние десятилетия в северных широтах планеты, ускоряет деградацию многолетней мерзлоты. Связанные с этим изменения многолетнемерзлых пород проявляются в увеличении глубины сезонного протаивания, что сопровождается снижением прочности многолетнемерзлых грунтов и нарушением объектов инфраструктуры. Более того, мерзлота, являясь хранилищем законсервированного углерода в обширных мерзлых торфяных болотах севера Евразии и Америки, при потеплении климата может стать источником возникновения еще большего потепления за счет высвобождения парниковых газов [1].

Одним из наиболее важных парниковых газов является метан, который, по данным [2], по величине прямого потенциала глобального потепления превышает углекислый газ. В качестве основных источников эмиссии метана на северных территориях рас-

сматриваются [3–5] болота, озерно-термокарстовые равнины и др. По оценкам [6], до четверти мирового объема метана сосредоточено в болотно-озерных ландшафтах Западной Сибири.

Согласно [7] наиболее активным источником эмиссии метана в арктических и субарктических районах являются малые термокарстовые озера. Образование термокарстовых водоемов и депрессий в связи с деградацией многолетней мерзлоты в условиях глобального потепления последних десятилетий наблюдается на Аляске, в Европе, в Сибири [8–10], на северных территориях которых в большом количестве образуются малые термокарстовые озера. Согласно [11] за три последние десятилетия на севере Западной Сибири преимущественное образование малых озер наблюдается в зоне сплошной мерзлоты.

Из-за своих малых размеров такие озера, как правило, не учитываются в прогнозных оценках вклада метана в общий парниковый эффект. В этих условиях обоснованная оценка вклада метана из малых термокарстовых озер в зоне вечной мерзлоты под влиянием климатических изменений является важной задачей, решение которой требует использования данных о свойствах полей малых термокарстовых озер в зоне сплошной мерзлоты, полученных для территории Западной Сибири с применением дистанционных методов ввиду ее труднодоступности. В рамках данной статьи под малыми будем понимать озера с площадью менее 0,5 га.

\* Юрий Михайлович Полищук (yupolishchuk@gmail.com); Ильдар Наильевич Муратов (ildarmur@gmail.com); Владимир Юрьевич Полищук (liquid\_metal@mail.ru).

В настоящее время в дистанционных исследованиях полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты используются преимущественно снимки среднего разрешения Landsat, не позволяющие однако дешифровать и надежно определять площади озер с размерами менее 0,5–1 га. В связи с этим целью настоящей работы явилось проведение исследования свойств полей малых термокарстовых озер в сплошной криолитозоне Западной Сибири с применением снимков высокого разрешения.

## Данные и объект исследования

Исследования проводились на территории зоны сплошного распространения многолетней мерзлоты Западной Сибири с использованием космических снимков высокого разрешения БКА (разрешение 2 м) и Alos (разрешение 2,5 м), коллекция которых включала 12 снимков. Спутник БКА – это белорусский аналог российского спутника Канопус-В, запущенный на орбиту сравнительно недавно (22 июля 2012 г.) и поставляющий относительно недорогие снимки высокого разрешения. Выбор тестовых участков (ТУ) для проведения дистанционных исследований производился в границах сцен космических снимков в местах активного термокарста [12], определяемого по наибольшему сгущению озер. Общая характеристика выбранных тестовых участков приведена в табл. 1, а их расположение дано на рис. 1, где показано местоположение зоны сплошной мерзлоты в соответствии с [13]. Координаты местоположения ТУ в табл. 1 (широта и долгота) соответствуют центрам ТУ.

Таблица 1

Характеристика тестовых участков

№ ТУ	Широта, град	Долгота, град	Тип снимка	Дата снимка	Площадь ТУ, га
1	70,48	67,81	БКА	19.07.2014	3118
2	70,20	68,31	БКА	19.07.2014	3622
3	69,58	68,60	БКА	19.07.2014	3527
4	69,29	68,97	БКА	19.07.2014	3442
5	69,94	71,98	БКА	20.07.2014	3191
6	71,08	79,67	БКА	03.08.2015	2990
7	70,70	77,37	БКА	02.08.2015	3284
8	69,96	77,11	БКА	29.06.2014	2690
9	69,88	77,10	БКА	29.06.2014	3550
10	67,88	76,96	Alos	05.07.2008	2894
11	67,95	77,79	Alos	05.07.2008	3045
12	67,55	82,03	Alos	02.07.2008	2577
13	67,26	82,80	Alos	02.07.2008	3563
14	67,48	83,33	Alos	02.07.2008	2473
15	68,01	69,90	БКА	31.08.2015	2977
16	67,49	70,44	БКА	31.08.2015	2915

Согласно [12] образование термокарстовых озер происходит под воздействием нескольких факторов, главными из которых являются 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 криолито-

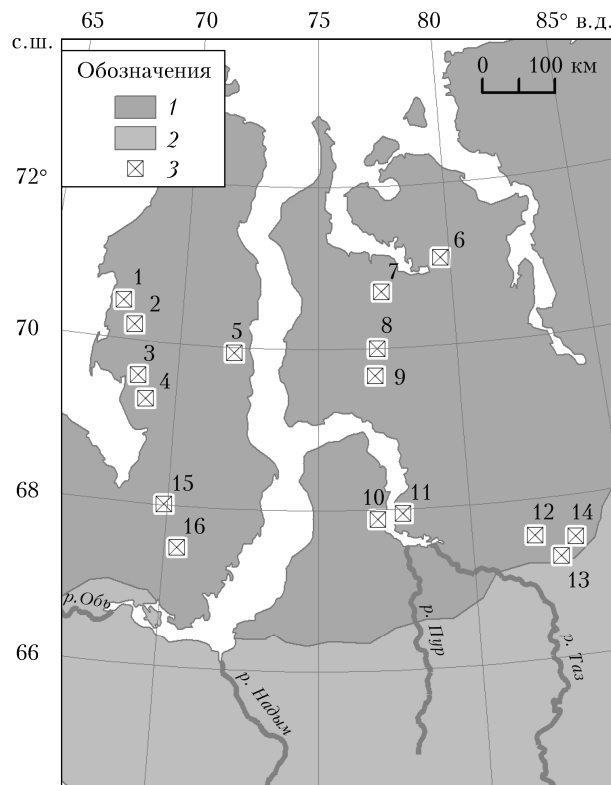


Рис. 1. Схема расположения тестовых участков в сплошной криолитозоне Западной Сибири: 1 – зона сплошного распространения мерзлоты; 2 – зона прерывистого распространения мерзлоты; 3 – тестовые участки

зоны расположены преимущественно озера термокарстового происхождения либо озера смешанного генезиса при значительном влиянии термокарстовых процессов. Например, в [9] 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.

Проверка равномерности распределения на исследуемой территории выбранных для исследований тестовых участков проводилась путем сопоставления схемы размещения тестовых участков с картами геокриологического и ландшафтного зонирования территории Западной Сибири. Как видно на рис. 1, выбранные тестовые участки довольно равномерно распределены по территории исследований.

Все выбранные для проведения дистанционных исследований 12 безоблачных космических снимков БКА и Alos получены в очень коротком интервале летнего времени: в конце июля и в августе, когда полностью исчезает ледовый покров озер, мешающий выделению озер при дешифрировании снимков. Обработка космических снимков проведена с использованием стандартных средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3. Для определения береговых границ озер использовалась бинарная классификация с помощью инструмента «Переклассификация». Для обеспечения приемлемой погрешности в определении

площадей озер минимальный размер регистрируемых озер определялся как полигон, в границах которого располагаются 9 пикселей. При разрешении снимка 2 м размер пикселя составляет 4 м<sup>2</sup>, что дает минимальный размер озера 36 м<sup>2</sup> (из расчета площади 3×3 пикселя).

## Результаты дистанционных исследований

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 дана в табл. 2. Общая площадь озер определялась как суммарная площадь озер на каждом ТУ. Плотность озер рассчитывалась как отношение числа озер на тестовом участке к его площади. Заозеренность территории определялась на каждом ТУ в виде отношения суммарной площади озер на тестовом участке к площади этого участка. Для общей характеристики полей озер на исследуемой территории в табл. 2 даны средние и среднеквадратические (СКО) значения указанных в таблице показателей, определенные по всем ТУ.

Как видно из табл. 2, размеры озер на разных тестовых участках изменяются в широких пределах — от 36 м<sup>2</sup> до нескольких сотен гектаров. Число озер разных размеров на исследованных тестовых участках варьирует от нескольких сотен до нескольких тысяч. Заозеренность территории на разных тестовых участках изменяется от 9,5 до 28,3% со средним значением 17,4%. Еще большую изменчивость на разных ТУ, как видно из табл. 2, проявляет плотность озер, диапазон изменения которой более чем в 2 раза превышает ширину диапазона изменений значений заозеренности.

В исследованиях термокарстовых озер средних и крупных размеров в зоне мерзлоты Западной Сибири, выполненных в [14] с использованием снимков среднего разрешения Landsat, установлено, что в диапазоне широт 69–70° с.ш. происходит смена трендов изменения площадей озер — от сокращения суммарных площадей (в южной области, на широтах ниже 69° с.ш.) к их росту (в северной области). В связи с этим представляет интерес исследование особенностей изменения изучаемых характеристик полей малых озер в указанных областях.

Анализ данных табл. 2 показывает, что значения плотности и заозеренности на широтах ниже 69° с.ш. (южная область, ТУ № 10–16) в среднем превышают их значения на ТУ № 1–9, расположенных на территории выше 69° с.ш. (северная область). Для подтверждения приведем рассчитанные средние и среднеквадратические значения указанных выше показателей полей малых озер: плотность  $0,09 \pm 0,04$  и  $0,35 \pm 0,21$  и заозеренность  $16,8 \pm 5,3$  и  $18,1 \pm 7,2\%$  в северной и южной областях соответственно. Следовательно, если относительное уменьшение заозеренности при переходе в северную область составляет 7%, то величина плотности в среднем сокращается до 4 раз. Заметим, что дать объяснение этим фактам только на основе результатов дистанционных исследований не представляется возможным. Для этого необходимо проведение комплексных наземных исследований с использованием геоэкологических и климатических методов.

Изучены распределения озер по их площадям. С использованием полученных данных о числе озер и их площадях были построены гистограммы распределения озер по площадям на всех ТУ. На рис. 2 приведена для иллюстрации гистограмма распределения озер на тестовом участке ТУ № 9 по снимку БКА, представленная в двойном логарифмическом масштабе, где ромбиками показаны значения относительного числа озер в интервалах гистограммы.

Таблица 2

Характеристики полей термокарстовых озер на разных тестовых участках

№ ТУ	Число озер	Максимальная площадь озера, га	Общая площадь озер, га	Плотность озер, га <sup>-1</sup>	Заозеренность, %
1	500	87,88	534	0,16	17,1
2	377	47,16	345	0,10	9,5
3	197	116,72	632	0,06	17,9
4	349	43,65	450	0,10	13,1
5	133	121,48	784	0,04	24,6
6	194	229,90	699	0,06	23,4
7	278	94,94	650	0,08	19,8
8	230	36,60	279	0,09	10,4
9	424	53,80	564	0,12	15,9
10	1818	112,24	744	0,63	25,7
11	1447	353,44	414	0,48	13,6
12	1493	22,53	571	0,58	22,2
13	675	30,08	349	0,19	9,8
14	461	36,69	378	0,19	15,3
15	378	18,50	361	0,13	12,1
16	674	80,39	824	0,23	28,3
Среднее	602	92,87	536	0,20	17,4
СКО	518	87,71	174	0,19	6,0

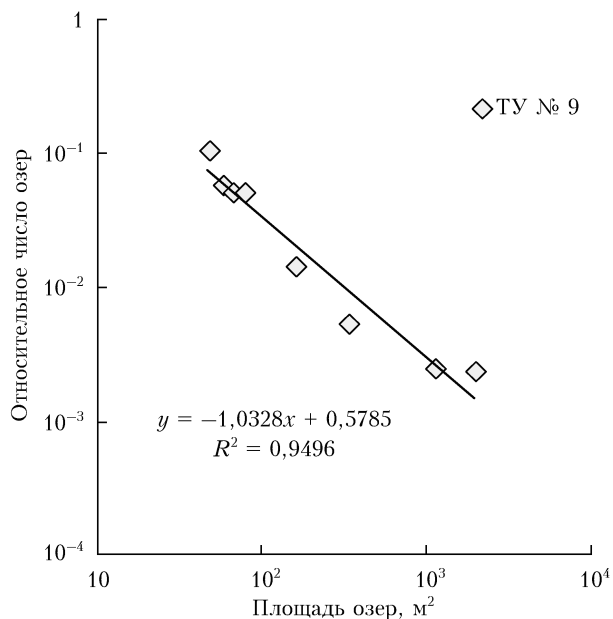


Рис. 2. Гистограмма распределения озер по площадям в двойном логарифмическом масштабе на ТУ № 9 и ее линейная аппроксимация

Можно показать, что представление графиков гистограмм в двойном логарифмическом масштабе удобно для проверки соответствия эмпирических распределений степенному закону распределения в виде

$$k = As^B, \quad (1)$$

где  $k$  – относительное число озер в интервалах гистограммы;  $s$  – площадь водной поверхности озер;  $A, B$  – коэффициенты степенной функции.

Прологарифмировав левую и правую части уравнения (1) и вводя подстановки  $\lg k = y$  и  $\lg s = x$ , приведем (1) к виду

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

Уравнение (2) демонстрирует линейную зависимость логарифма относительного числа озер от ло-

гарифма их площадей на графиках гистограмм. Следовательно, если гистограмма распределения озер, представленная в двойном логарифмическом масштабе, допускает линейную аппроксимацию, то распределение озер по площадям будет следовать степенному закону. Действительно, как видно из рис. 2, прямая отображает график аппроксимирующей линейной зависимости, полученной с высоким уровнем достоверности (коэффициент детерминации 0,95) в виде (2), что может служить подтверждением степенного закона распределения озер по площадям в виде (1). Из уравнения аппроксимации, приведенного в поле графика на рис. 2, определим следующие величины коэффициентов степенного закона распределения озер по площадям для ТУ № 9:  $A = 3,79$ ;  $B = -1,03$ .

Аналогичная аппроксимация эмпирических гистограмм распределения озер была проведена по графикам гистограмм на всех остальных ТУ. Рассчитанные значения коэффициентов степенного закона распределения озер для разных ТУ представлены в табл. 3, из которой видно, что коэффициент  $B$ , определяющий вид степенной функции, изменяется на разных ТУ в сравнительно небольшом интервале значений: от  $-1,66$  до  $-0,62$  (со средним значением  $-1,08$ ), что является показателем сравнительно слабой изменчивости вида распределения озер по площадям на разных ТУ.

На рис. 3 приведен график семейства гистограмм распределения озер на всех исследованных ТУ, представленный в двойном логарифмическом масштабе. Отрезком прямой линии на графике отображается результат линейной аппроксимации усредненной (по всем исследованным ТУ) гистограммы распределения малых озер по их площадям на исследуемой территории с высоким уровнем коэффициента детерминации (0,95), что является основанием принять соответствие эмпирического распределения озер по площадям на исследованной территории степенному закону.

Как видно из рис. 3, несмотря на существенные различия в плотности озер и степени заозеренности

Таблица 3

Значения коэффициентов степенного закона распределения озер по данным исследований на разных тестовых участках

№ ТУ	Коэффициенты степенного закона		Коэффициент детерминации
	$B$	$A$	
1	-1,11	5,57	0,94
2	-0,91	1,78	0,96
3	-0,81	0,84	0,63
4	-0,83	1,08	0,91
5	-0,95	2,45	0,83
6	-1,02	3,22	0,89
7	-0,62	0,28	0,82
8	-0,94	1,87	0,79
9	-1,03	3,79	0,95
10	-1,51	122,57	0,99
11	-1,66	262,72	0,99
12	-1,46	76,35	0,96
13	-1,37	48,00	0,94
14	-1,37	37,85	0,90
15	-0,86	1,05	0,80
16	-0,86	1,04	0,97

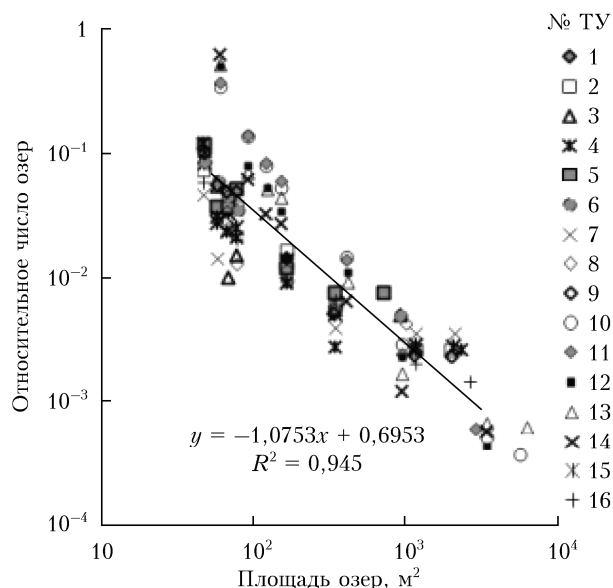


Рис. 3. Линейная аппроксимация усредненной по всем тестовым участкам гистограммы распределения малых озер по площадям в сплошной криолитозоне Западной Сибири

территорий на разных ТУ (см. табл. 2), графики гистограмм распределений озер по их размерам на всех ТУ достаточно близки друг к другу, что свидетельствует об относительно слабой изменчивости эмпирических распределений малых термокарстовых озер на разных тестовых участках. На основании графика семейства гистограмм (см. рис. 3) можно считать, что степенному закону будет подчиняться распределение малых озер сплошной криолитозоны Западной Сибири, размеры которых находятся в интервале площадей от  $50 \text{ м}^2$  до  $0,5 \text{ га}$ .

Заметим, что выполненные в последнее время исследования распределения озер в планетарном масштабе [15, 16] позволили установить степенной вид закона распределения озер по их размерам на глобальном уровне. В этих исследованиях наряду с картографическими материалами по озерам Земли использовались снимки среднего пространственного разрешения, на которых не обнаруживаются малые озера. Приведенные в настоящей статье результаты региональных исследований термокарстовых озер на территории мерзлоты Западной Сибири, полученные на основе снимков высокого разрешения, показывают, что и распределение малых термокарстовых озер по их размерам в зоне сплошной мерзлоты соответствует степенному закону, как и распределение озер в глобальном масштабе.

### Заключение

Изложены результаты дистанционного исследования свойств полей малых термокарстовых озер криолитозоны Западной Сибири, полученные с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения БКА (разрешение  $2 \text{ м}$ ) и Alos (разрешение  $2,5 \text{ м}$ ), позволивших дешифровать озера малых размеров (от  $36 \text{ м}^2$ ).

По результатам дешифрирования спутниковых снимков на каждом тестовом участке определены количество озер, их площади и степень заозеренности территории. Число озер разных размеров на исследованных тестовых участках варьирует от нескольких сотен до нескольких тысяч. Заозеренность территории на разных тестовых участках изменяется от 9,5 до 28,3% со средним значением 17,4%.

Построены графики гистограмм распределения озер по площадям на каждом тестовом участке, представленные в двойном логарифмическом масштабе с целью проверки соответствия эмпирических распределений степенному закону распределения. Статистический анализ эмпирических гистограмм распределения озер показал, что распределение озер по их площадям на всех исследованных участках может быть принято соответствующим степенному закону.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 14-01-31489 и 15-45-00075).

1. 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 fueled by Pleistocene Carbon // Science. 1997. V. 277, N 5327. P. 800–802.
2. Кароль И.Л. Оценки характеристик относительного вклада парниковых газов в глобальное потепление климата // Метеорол. и гидрол. 1996. № 11. С. 5–12.
3. Краснов О.А., Maksutov S.S., Давыдов Д.К., Фофанов А.В., Глаголев М.В., Inoue G. Мониторинг эмиссии метана и двуокиси углерода из почвы в атмосферу и параметры почвы. Бакчарское болото Томской области // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 7. С. 644–654.
4. Романов А.Н., Хвостов И.В., Павлов В.Е., Винокуров Ю.И. Дистанционный мониторинг заболоченных территорий Западной Сибири с использованием данных спутника SMOS // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 2. С. 150–153; Romanov A.N., Khvostov I.V., Pavlov V.E., Vinokurov Yu.I. Remote Monitoring of wetland areas of Western Siberia using SMOS (ESA) data // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 4. P. 313–316.
5. 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. Roy. Soc. London. A. 2007. V. 365. P. 1657–1676. DOI: 10.1098/rsta.2007.2036.
6. 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 (14 p.).
7. 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 // Biogeosci. 2011. V. 8, N 3. P. 565–583.
8. Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland // Permafrost Periglacial Processes. 2003. V. 14. P. 19–27.
9. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изучение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли. 2009. Т. 13, № 2. С. 12–26.
10. Polishchuk Y.M., Bryksina N.A., Polishchuk V.Y. Remote analysis of changes in the number and distribution of small thermokarst lakes by sizes in Cryolithozone

- of Western Siberia // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2015. V. 19, N 2. P. 100–105.
11. *Брыксина Н.А., Полищук Ю.М.* Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // *Криосфера Земли*. 2015. Т. 19, № 2. С. 114–120.
  12. *Викторов А.С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
  13. *Атлас СССР* / Отв. ред. Т.П. Сидоренкова. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1984. 260 с.
  14. *Polishchuk Y., Kirpotin S., Bryksina N.* Remote study of thermokarst lakes dynamics in West-Siberian permafrost // *Permafrost: Distribution, composition and impacts on infrastructure and ecosystems* / Ed. O. Pokrovsky. NY: Nowa Publishers, 2014. P. 173–204.
  15. *Downing J.A., Prairie Y.T.* The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments // *Limnol. Oceanogr.* 2006. V. 51, N 5. P. 2388–2397.
  16. *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. V. 41, N 18. P. 1–7.

*Y.M. Polishchuk, I.N. Muratov, V.Y. Polishchuk.* **Study of fields of small thermokarst lakes in the continuous permafrost of Western Siberia by high resolution satellite images.**

The results of the remote study of small thermokarst lakes using satellite images of BKA and Alos received during summer months 2008–2014 are presented. Researches were carried out at 16 test sites in the continuous permafrost of Western Siberia. At each test site, the number of lakes, their sizes, density of lakes, limnicity of territory were determined and histograms of size distribution of lakes were built. It is shown that empirical size distribution of lakes corresponds to a power law.