

УДК 551.345:528.88

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И ИХ ДИНАМИКИ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Брыксина Наталья Анатольевна¹,
bryksina83@gmail.com

Полищук Юрий Михайлович^{2,3},
yupolishchuk@gmail.com

¹ Институт прикладной информатики и математической геодезии Балтийского Федерального университета им. И. Канта, Россия, 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14.

² Центр дистанционного зондирования Земли Югорского научно-исследовательского института информационных технологий, Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151.

³ Научно-исследовательский информационный центр Института химии нефти СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4.

Актуальность работы обусловлена недостаточно изученными закономерностями распределения размеров и динамики термокарстовых озер, рассматриваемых в качестве активных источников эмиссии метана в атмосферу в арктических районах в условиях глобального потепления последних десятилетий.

Цель работы: дистанционное исследование динамики термокарстовых озер и распределения их площадей в Арктической зоне Западной Сибири на основе космических снимков среднего и сверхвысокого разрешения.

Методы исследования: методы ключевых (тестовых) участков; дистанционные методы исследования полей термокарстовых озер с использованием спутниковых снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения; метод разновременных спутниковых снимков для изучения динамики озер; методы геоинформационных систем для пространственного анализа данных о термокарстовых озерах, полученных из спутниковых изображений.

Результаты. Анализ экспериментальных данных о размерах термокарстовых озер с площадью от нескольких десятков до сотен кв. м, полученных по снимкам сверхвысокого разрешения, показал, что гистограммы распределения малых озер по площадям в Арктической зоне Западной Сибири допускают их аппроксимацию как степенными, так и экспоненциальными функциями. На основе дистанционных исследований динамики термокарстовых озер по разновременным снимкам среднего разрешения, полученных за период 1973–2013 гг. в Арктической зоне Западной Сибири, установлены отличия динамики в разных ландшафтных зонах. В зоне арктической тундры Западной Сибири в среднем проявляется тенденция роста суммарной площади озер, в субарктической тундре – тенденция ее сокращения, а в зоне лесотундры особенностей изменения площадей озер во времени не выявлено.

Ключевые слова:

Многолетняя мерзлота, Сибирская Арктика, геоинформационные системы, площади озер, разновременные спутниковые снимки, изменение климата, тестовые участки, ландшафтный анализ.

Введение

Современное глобальное потепление климата, наиболее явно проявляющееся в северных широтах планеты, ускоряет деградацию многолетней мерзлоты. Мерзлота, являясь хранилищем законсервированного углерода в обширных мерзлых торфяных болотах Сибири и Северной Америки, при потеплении климата может стать источником возникновения еще большего потепления при высвобождении парниковых газов [1]. Потепление в арктических регионах в последние сто лет происходило почти вдвое интенсивнее, чем в среднем по земному шару. В частности, рост температуры приземного арктического воздуха за период 1950–2010 гг. составил 0,4 °C в летние и 1,65 °C в зимние месяцы [2]. Наиболее чувствительными к температурным изменениям на территории многолетней мерзлоты оказываются озерно-термокарстовые ландшафты [3, 4].

Таяние мерзлоты в условиях современного потепления климата вызывает снижение прочности многолетнемерзлых грунтов, что сопровождается, согласно [5–9], увеличением численности и изменением размеров термокарстовых озер в зоне мерзлоты. Образование термокарстовых озер в связи с деградацией многолетней мерзлоты в условиях глобального потепления последних десятилетий наблюдается на Аляске, в Канаде, Скандинавии и в Западной и Восточной Сибири [10–14], значительную долю которых занимают малые термокарстовые озера. Так, согласно [5], число вновь образующихся малых озер за период последних четырех десятилетий в зоне мерзлоты Западной Сибири более чем в 20 раз превышает число озер, исчезнувших за это же время. Согласно [14, 15], наиболее активным источником эмиссии метана в зонах многолетней мерзлоты являются малые термокарстовые озера с площадью менее 0,01–0,02 га, что

связано с активной термокарстовой эрозией берегов, увеличивающей эмиссию метана [16]. Из-за своих малых размеров такие озера, как правило, не учитываются в прогнозных оценках вклада метана в общий парниковый эффект.

Важными для прогноза эмиссии метана из термокарстовых озер в зоне мерзлоты являются знания о динамике площадей озер и законах распределения малых озер по их площадям. Исследования распределения малых озер по размерам проводились на территории Восточной Сибири [10]. В [6] изложены результаты исследований распределения озер на территории Западной Сибири, находящейся южнее Арктической зоны. Поэтому представляет интерес изучение особенностей распределения площадей малых озер в Арктической зоне Западной Сибири. Динамика площадей термокарстовых озер на различных территориях в зонах мерзлоты изучалась в ряде работ, например [4, 9, 13]. Однако, насколько нам известно, особенности многолетней динамики озер Арктической зоны исследованы недостаточно. В связи с этим целью работы явилось дистанционное исследование закономерностей распределения по площадям термокарстовых озер и их динамики в арктических районах Западной Сибири в условиях потепления климата последних десятилетий с использованием спутниковых снимков.

1. Исследование распределения площадей малых термокарстовых озер

Исследования проводились в Арктической зоне Западной Сибири, представляющей собой территорию, расположенную к северу от Северного полярного круга. Для проведения исследований сформирована коллекция космических снимков Quick Bird сверхвысокого разрешения (0,6 м), включающая 9 снимков. Выбор тестовых участков (ТУ) для проведения исследований производился в границах сцен космических снимков в местах активного термокарста, определяемого по наибольшему сгущению озер.

На рис. 1 представлена карта-схема расположения ландшафтных зон исследуемой территории Западной Сибири, составленная на основе [17], на которой видно, что выбранные тестовые участки довольно равномерно распределены по территории исследований. Общая характеристика выбранных тестовых участков дана в табл. 1, из которой видно, что для исключения влияния изменений водности на территории термокарстово-озерных ландшафтов космические снимки выбирались в течение достаточно короткого теплого периода, не превышающего трех месяцев (с 1 июня по 28 августа).

Обработка космических изображений и определение площадей озер по спутниковым снимкам выполнены с использованием программных средств

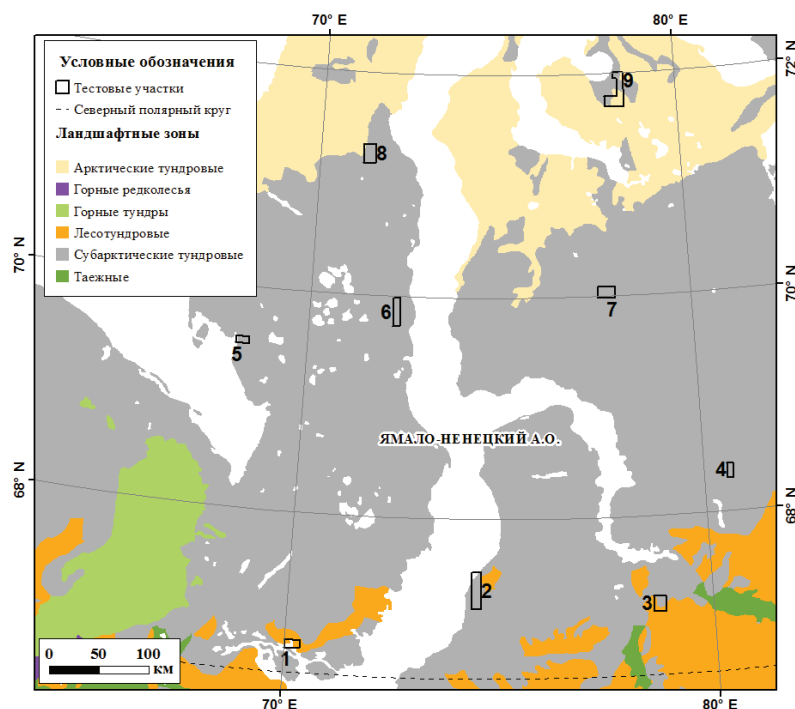


Рис. 1. Карта-схема ландшафтного зонирования территории Арктической зоны Западной Сибири с обозначенными границами тестовых участков для исследования распределения площадей малых озер

Fig. 1. Schematic map of landscape zoning for the territory of Western Siberia Arctic zone with the marked boundaries of the test sites for studying small lakes distribution

ENVI 4.7 и ArcGIS 9.3. Классификация водных объектов на снимках проводилась способом двоичного кодирования (алгоритм Binary encoding classification) в программном обеспечении ENVI 4.7. На каждом тестовом участке средствами ArcGIS 9.3 были определены от нескольких сотен до нескольких тысяч термокарстовых озер.

Таблица 1. Данные о времени съемки и местоположении тестовых участков

Table 1. Data on shooting time and location of the test sites (TS)

№ ТУ TS number	Дата съемки Shooting date	Долгота Longitude	Широта Latitude	Площадь участка, км ² TS area, km ²
1	Quick Bird (04.07.2008)	70,1	66,5	131,0
2	Quick Bird (02.08.2004)	74,3	67,2	340,6
3	Quick Bird (28.08.2005)	78,4	67,1	198,6
4	Quick Bird (01.05.2009)	80,4	68,2	88,0
5	Quick Bird (05.07.2008)	68,2	69,3	98,6
6	Quick Bird (15.08.2003)	72,2	69,5	205,2
7	Quick Bird (28.07.2004)	77,5	70,2	197,0
8	Quick Bird (28.08.2005)	71,2	71,2	237,0
9	Quick Bird (04.07.2008)	78,2	71,5	381,8

В табл. 2 представлены данные об основных статистических параметрах выборочных совокупностей малых термокарстовых озер.

Таблица 2. Характеристика выборочных совокупностей малых озер на разных тестовых участках

Table 2. Sample characteristics of small lakes on different test sites

№ ТУ TS number	Объем выборки Sample size	Среднее значение площади озер, м ² Average area of lake, m ²
1	6725	41,97
2	283	44,92
3	7810	12,37
4	8094	19,88
5	456	66,66
6	509	53,36
7	3315	24,20
8	3035	11,70
9	3910	10,38

Для всех исследованных ТУ были построены гистограммы распределения числа малых термокарстовых озер по их площадям на основе результатов дистанционного измерения площадей озер по снимкам сверхвысокого разрешения. На рис. 2 приведен пример экспоненциальной аппроксимации гистограммы распределения озер по площадям, полученной по экспериментальным данным на ТУ-1. Здесь K_i – относительное число озер, попа-

дающих в каждый i -й интервал гистограммы, определяемое по формуле

$$K_i = \frac{n_i}{N},$$

где n_i – число озер в каждом интервале гистограммы; i – номер интервала; N – суммарное количество озер на исследуемом тестовом участке. Для удобства интервалы гистограммы обозначены в единицах площадей озер.

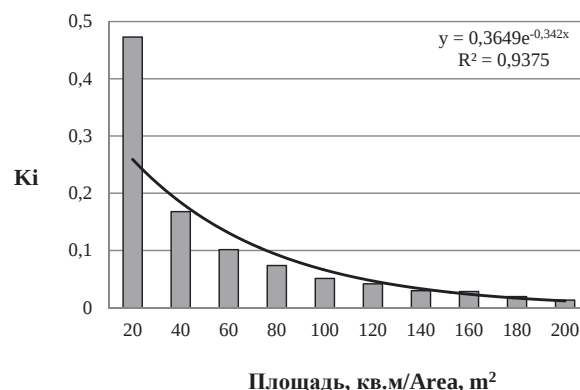


Рис. 2. Пример экспоненциальной аппроксимации гистограммы распределения малых озер по площадям на ТУ-1

Fig. 2. Example of exponential approximation of small lakes empirical distribution in areas on the TS-1

Согласно рис. 2, график гистограммы распределения озер, полученной по снимкам сверхвысокого разрешения, демонстрирует характерную закономерность – уменьшение относительного числа озер по мере увеличения их площадей (рис. 2). Эта закономерность проявляется и при анализе гистограмм распределения площадей термокарстовых озер больших размеров, полученных в [18] по результатам дистанционного измерения площадей озер по космическим снимкам Landsat среднего разрешения (30 м). Как видно на рис. 2, эмпирическое распределение озер по площадям с достаточно высоким значением коэффициента детерминации может быть аппроксимировано экспоненциальной функцией с коэффициентами $\alpha=0,3649$ и $\beta=-0,342$. Аналогично рис. 2 гистограммы на остальных тестовых участках тоже допускают экспоненциальную аппроксимацию (с высоким уровнем коэффициента детерминации R^2 – более 0,90).

Можно показать, что гистограммы распределения малых озер по площадям на всех тестовых участках допускают также аппроксимацию и степенной функцией в виде

$$y = a \cdot x^b,$$

где a и b – коэффициенты степенной аппроксимации.

В табл. 3 приведены значения коэффициентов экспоненциальной и степенной аппроксимаций гистограмм распределения малых озер по их площадям на всех исследованных тестовых участках. Представленные в этой таблице достаточно высо-

кие значения коэффициентов детерминации подтверждают достоверность аппроксимации гистограмм как экспоненциальной (среднее значение $R^2=0,84$), так и степенной (среднее значение $R^2=0,94$) функциями. Сравнение приведенных здесь средних значений коэффициентов детерминации показывает, что аппроксимация гистограмм степенным законом распределения дает более высокую достоверность. Заметим, что степенным законом описываются эмпирические распределения озер по площадям и в исследованиях на планетарном уровне [19].

Таблица 3. Коэффициенты аппроксимации гистограмм распределения озер по площадям

Table 3. Approximation coefficients of empirical distribution of lakes' areas

Номер ТУ TS number	Экспоненциальная аппроксимация Exponential approximation			Степенная аппроксимация Power approximation		
	α	β	R^2	a	b	R^2
1	0,36	0,34	0,94	0,50	-1,45	0,98
2	0,34	0,32	0,91	0,46	-1,36	0,98
3	0,21	0,50	0,75	0,45	-2,3	0,95
4	0,27	0,43	0,79	0,50	-1,99	0,97
5	0,28	0,22	0,95	0,30	-0,88	0,87
6	0,37	0,31	0,99	0,45	-1,27	0,95
7	0,34	0,44	0,86	0,58	-1,97	0,99
8	0,18	0,47	0,71	0,40	-2,21	0,93
9	0,15	0,40	0,63	0,29	-1,93	0,85
Средние значения Average values	0,28	0,38	0,84	0,44	-1,71	0,94

2. Исследование динамики площадей термокарстовых озер

При исследовании многолетней динамики озер необходимо использовать коллекцию разновременных спутниковых снимков за период не менее 30–50 лет, чтобы выявить изменения климатического масштаба. К сожалению, время съемки имеющихся в настоящее время снимков высокого и сверхвысокого разрешения в лучшем случае не превышает 10–15 лет. Единственно пригодными для изучения многолетней динамики термокарста являются снимки с космических аппаратов Landsat, архивы которых накапливаются уже более 40 лет. Как показывает опыт отечественных и зарубежных дистанционных исследований, эти снимки широко используются для изучения динамики термокарстовых озер в зонах мерзлоты разных регионов. Однако в Арктической зоне закономерности динамики озер изучены недостаточно.

Исследования динамики термокарстовых озер в Арктической зоне Западной Сибири проводились на 14 тестовых участках, выбранных в местах активного термокарста и исходя из условия наличия пар разновременных безоблачных снимков Landsat на каждый тестовый участок. Как видно из табл. 4, в которой дана общая характеристика вы-

бранных ТУ, площади участков приблизительно одинаковы, а их сравнительно небольшие размеры позволяют обеспечить относительную однородность геокриологических и ландшафтных свойств территорий тестовых участков.

Таблица 4. Характеристика тестовых участков

Table 4. Characteristic of test sites

Район исследования Study area	Количество тестовых участков Number of test sites	Интервал изменений площади ТУ, тыс. км ² Interval of TS area changes, thousands km ²	Средняя площадь тестовых участков, тыс. км ² Average area of test sites, thousands km ²
Западная Сибирь Western Siberia	14	2,2–4,1	3,506

На рис. 3, представляющем карта-схему расположения ландшафтных зон на территории Западной Сибири, показано местоположение выбранных ТУ. Видно, что тестовые участки достаточно равномерно размещены на исследуемой территории. Распределение их по ландшафтным зонам Западной Сибири дано в табл. 4.

Исследование изменений площадей термокарстовых озер на выбранных тестовых участках выполнено дистанционным методом с использованием разновременных космических снимков. Для проведения дистанционных исследований на каждый тестовый участок были подобраны разновременные пары безоблачных снимков Landsat, полученные в летние месяцы в период с 1973 по 2013 г. Все снимки отобраны из общедоступного архива Global Land Cover Facility, имеют географическую привязку в проекции UTM и относятся к уровню обработки 1T, включающему радиометрическую и геометрическую коррекцию с использованием цифровых моделей рельефа. Общее количество снимков Landsat на территории исследования в Западной Сибири составило 28. Обработка космических снимков и определение площадей озер выполнены с использованием программных средств ENVI 4.7 и ArcGIS 9.3.

На основе полученных результатов дистанционного измерения площадей озер был проведен количественный анализ временных изменений суммарных площадей термокарстовых озер за время исследований. Для каждого тестового участка рассчитывались суммарные площади озер в разные годы наблюдений и были определены абсолютные и относительные величины их изменения в достаточно длительных временных интервалах в пределах 1973–2013 гг. Величина относительного изменения суммарной площади определялась в соответствии с формулой:

$$R = (S_k - S_n) / S_n,$$

где S_k и S_n – суммарная площадь озер на тестовом участке в конечный и начальный годы исследования соответственно.

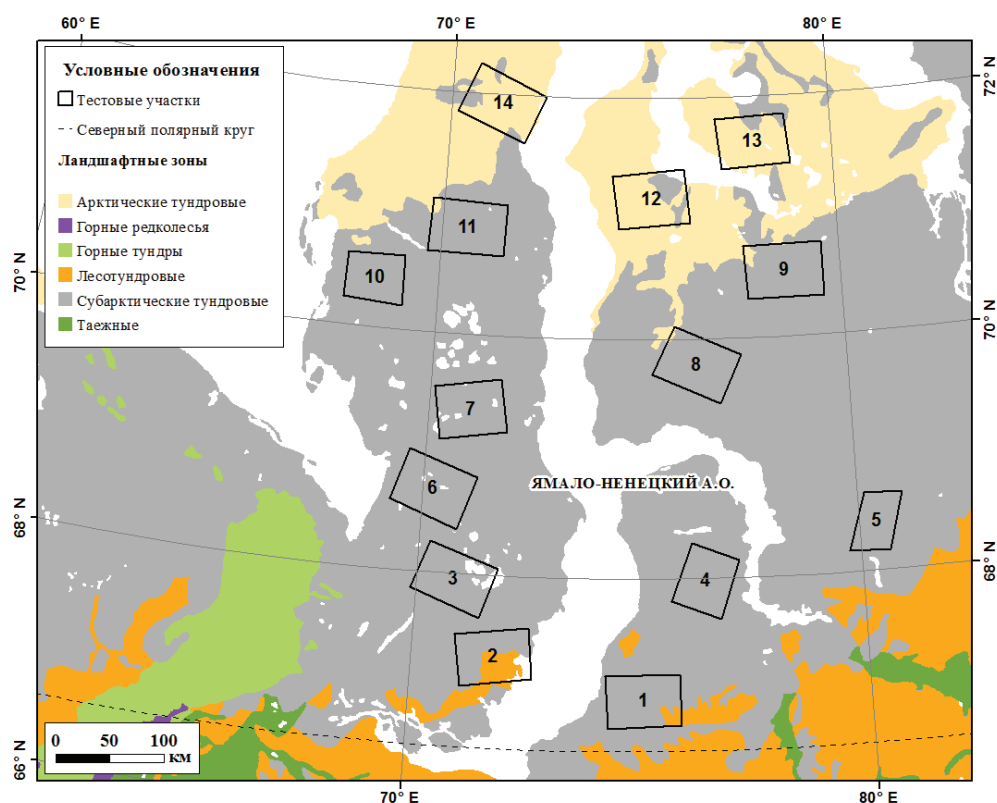


Рис. 3. Карта-схема ландшафтного зонирования исследуемой территории с обозначенными границами тестовых участков для изучения многолетней динамики полей термокарстовых озер

Fig. 3. Schematic map of landscape zoning for the research territory with the marked boundaries of the test sites for studying long-term dynamics of thermokarst lakes fields

Положительные значения R показывают увеличение суммарной площади озер, а отрицательные значения этой величины – сокращение площади озер. Нулевое значение R , означающее отсутствие изменений площадей озер за период наблюдений, показывает уравнивание двух тенденций изменения площадей, а именно: роста или сокращения площадей в среднем во времени.

Рассчитанные величины показателя R представляются далее в виде графических зависимостей величины относительного изменения суммарных площадей озер от географической широты, анализ которых позволяет выявлять основные тенденции во временных изменениях площадей озер в зависимости от ландшафтного зонирования территории и изменения географической широты.

График относительного изменения суммарных площадей озер (показатель R) в Арктической зоне Западной Сибири в зависимости от географической широты представлен на рис. 4, на котором точками показаны средние значения показателя R на каждом ТУ, а крестиком – их усредненное значение по всем тестовым участкам на этой территории, равное 2,4 %. Следовательно, на исследуемой территории Арктической зоны Западной Сибири в среднем преобладает тенденция сокращения пло-

щадей термокарстовых озер. Аналогичная тенденция сокращения суммарной площади озер за период 1973–1998 гг. была выявлена, по данным [21], и в прерывистой зоне многолетней мерзлоты.

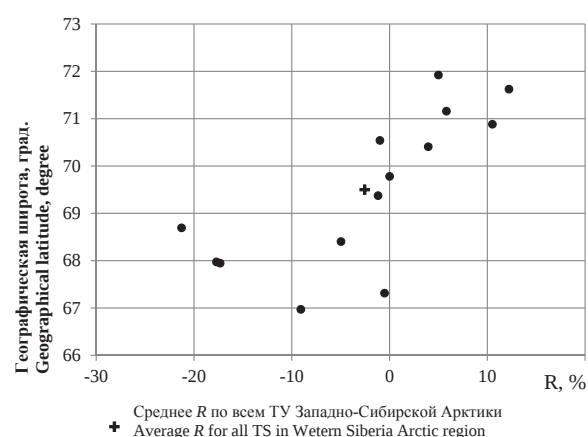


Рис. 4. Относительные величины изменения суммарной площади озер в зависимости от географической широты в Арктической зоне Западной Сибири

Fig. 4. Relative values of change in the total area of lakes depending on the latitude in the Arctic zone of Western Siberia

Однако можно отметить и особенности многолетней динамики озер в зависимости от широты. Как видно на рис. 4, на широтах более 70° с. ш. в среднем наблюдается рост суммарной площади озер, а на широтах менее 70° с. ш. – сокращение их площади. Следовательно, можно считать, что в Арктической зоне Западной Сибири диапазон широт вблизи значений 70° с. ш. является областью перехода от тенденции сокращения площадей термокарстовых озер к тенденции их роста в среднем при увеличении географической широты.

Рассмотрим изменение величины R в зависимости от ландшафтного зонирования исследуемой территории. На рис. 5 представлен график относительного изменения суммарной площади озер по ландшафтным зонам. Длина серой полоски равна среднему значению показателя R , рассчитанному для соответствующей ландшафтной зоны.

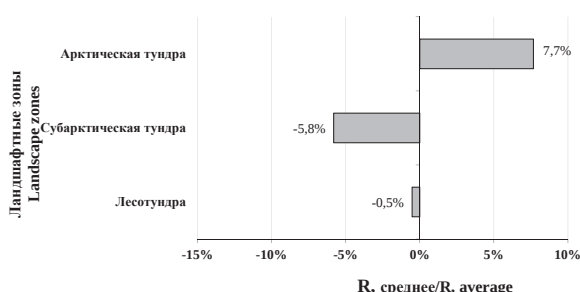


Рис. 5. Среднее значение относительного изменения суммарной площади озер в разных ландшафтных зонах территории Арктики Западной Сибири

Fig. 5. Average value of relative change in the total area of lakes in different landscape zones of Western Siberia Arctic region

Как видно на рис. 5, тенденция роста площадей озер в арктической тундре Западной Сибири изменится на тенденцию сокращения площадей при переходе в зону субарктической тундры. Отметим, что в зоне лесотундры не проявляется какой-либо выраженной тенденции в изменении суммарной площади озер, так как величина показателя R на графике близка к нулю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. North Siberian lakes: a methane source fuelled by Pleistocene Carbon / S.A. Zimov, Y.V. Voropaev, I.P. Semiletov, S.P. Davidov, S.F. Prosiannikov, F.S. Chapin, M.C. Chapin, S. Trumbore, S. Tyler // Science. – 1997. – V. 277. – № 5327. – P. 800–802.
2. МГЭИК, 2007. Отчет межправительственной группы экспертов по изменению климата. URL: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf (дата обращения: 10.05.2016).
3. Викторов А.С., Капралова В.Н., Трапезникова О.Н. Математическая модель морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин в изменяющихся климатических условиях // Криосфера Земли. – 2015. – № 2. – С. 26–34.
4. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting // International Journal of Environmental Studies. – 2009. – V. 66. – № 4. – P. 423–431.

Заключение

В статье представлены результаты дистанционного исследования статистического распределения площадей малых термокарстовых озер (с площадью до 200 м^2). Такие озера вызывают в последнее время значительный интерес у исследователей термокарстовых процессов в зоне мерзлоты на арктических территориях в связи с тем, что они рассматриваются в качестве важных источников эмиссии метана в атмосферу на территории озерно-термокарстовых равнин в Арктике в условиях потепления климата последних десятилетий. Эти исследования выполнены на 9 тестовых участках в Арктической зоне Западной Сибири с использованием спутниковых снимков сверхвысокого пространственного разрешения ($0,6 \text{ м}^2$). Анализ полученных экспериментальных данных о размерах и численности термокарстовых озер показал, что гистограммы распределения озер по площадям допускают их аппроксимацию как степенными, так и экспоненциальными функциями, однако степенная аппроксимация дает более высокую достоверность.

Изучены закономерности многолетней динамики полей термокарстовых озер в Арктической зоне Западной Сибири на основе космических снимков среднего разрешения. Исследования проведены на 14 тестовых участках, расположенных в разных ландшафтных зонах арктической территории многолетней мерзлоты. Использованы разновременные космические снимки Landsat, полученные за период 1973–2013 гг. Проведенный анализ показал существенные различия в динамике термокарстовых озер в разных ландшафтных зонах. Так, в зоне арктической тундры в среднем проявляется тенденция роста суммарной площади озер, в субарктической тундре – сокращения площадей озер, а в зоне лесотундры каких-либо выраженных тенденций изменения площадей озер со временем не выявлено.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ по проектам № 16–35–50143 и 15–45–00075.

5. 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. 19. – № 2. – С. 114–120.
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 Y., Kirpotin S., Bryksina N. Remote study of thermokarst lakes dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 5 // In: Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems / Ed. by O. Pokrovsky. – NY: Nova Science Publishers, 2014. – P. 173–204.
8. Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 4. – С. 88–96.

9. Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. Ch. 4. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections / A.I. Shiklomanov, R.B. Lammers, D.P. Lettermaier, Y.M. Polishchuk, O.G. Savichev, L.C. Smith / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht; Heidelberg; New-York; London: Springer, 2013. – P. 111–154.
10. Distribution of Thermokarst Lakes and Ponds at Three Yedoma Sites in Siberia / G. Grosse, V. Romanovsky, K. Walter, A. Morgenstern, H. Lantuit, S. Zimov // Proc. of the 9th Intern. Conf on Permafrost. – Fairbanks, Alaska, June 29 – July 3, 2008. – P. 551–556.
11. Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // J. Geophys. Res. – 2006. – V. 111. – P. 1–11. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005JG000150/pdf> (дата обращения 03.04.2016).
12. Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland // Permafrost and Periglacial Processes. – 2003. – V. 14. – P. 19–27.
13. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalén, Northern Sweden, especially 1960–1997 // Permafrost and Periglacial Processes. – 2000. – V. 11. – P. 55–69.
14. 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 // Biogeosciences. – 2011. – V. 8. – P. 565–583.
15. Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озерах криолитозоны Западной Сибири / Ю.М. Полищук, В.Ю. Полищук, Н.А. Брыксина, О.С. Покровский, С.Н. Кирпотин, Л.С. Широкова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг Георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 127–136.
16. 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. – V. 365. – P. 1657–1676.
17. Ландшафтная карта СССР / под ред. И.С. Гудилина. – М.: Моск. госуд. университет, 1987. URL: http://www.landscape.edu.ru/science_maps.shtml (дата обращения: 03.04.2016).
18. Полищук Ю.М., Полищук В.Ю. Имитационное моделирование полей термокарстовых озер на территории многолетней мерзлоты // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 1. – С. 53–60.
19. 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. – № 18. – P. 1–7.
20. 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.
21. Disappearing Arctic Lakes / L.C. Smith, Y. Sheng, G.M. MacDonald, L.D. Hinzman // Science. – 2005. – V. 308. – № 3. – P. 1429.

Поступила 14.06.2016 г.

Информация об авторах

Брыксина Н.А., кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института прикладной информатики и математической геодезии Балтийского федерального университета им. И. Канта.

Полищук Ю.М., доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Центра дистанционного зондирования Земли Югорского научно-исследовательского института информационных технологий; главный научный сотрудник научно-исследовательского информационного центра Института химии нефти СО РАН.

UDC 551.345:528.88

STUDYING THE DISTRIBUTION OF THERMOKARST LAKES AREAS IN ARCTIC ZONE OF WESTERN SIBERIA AND THEIR DYNAMICS BY THE ULTRAHIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGES

Natalia A. Bryksina¹,
bryksina83@gmail.com

Yury M. Polishchuk²,
yupolishchuk@gmail.com

¹ Kant Baltic Federal University,
14, A. Nevskogo street, Kaliningrad, 236041, Russia.

² Institute of Petroleum Chemistry,
4, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634021, Russia.

The relevance of the paper is caused by insufficiently studied regularities of distribution of sizes and dynamics of thermokarst lakes, considered as the most active sources of methane emissions to the atmosphere in the Arctic regions under global warming.

The main aim of the study is the remote research of dynamics of thermokarst lakes and distribution of their areas in the Arctic zone of Western Siberia, based on middle and ultra-high resolution satellite images.

Methods: methods of key (test) sites; remote method of research of thermokarst lakes fields, including small lakes, using satellite images of high and very high spatial resolution; method of multi-temporal satellite images for studying the lakes' dynamics; techniques of geographic information systems for the spatial analysis of data on thermokarst lakes obtained from satellite images.

The results. The analysis of experimental data on the size of thermokarst lakes, which area is from a few tens to hundreds of square meters, obtained by the ultra-high resolution images, showed that the histograms of size-distribution of small lakes in Arctic zone of Western Siberia allow their approximation both by power and exponential functions. Based on remote sensing studies of the dynamics of thermokarst lakes on multi-temporal images of medium resolution obtained for 1973–2013 in the Arctic zone of Western Siberia, the differences of the dynamics were determined in different landscape zones. In the area of the Arctic tundra of Western Siberia there is in average a tendency of growing total area of lakes, in the subarctic tundra there is the tendency to reduce it, and in the forest tundra the features of temporal changes of lake areas were not identified.

Key words:

Permafrost, Siberian Arctic, geoinformation systems, areas of lakes, multi-temporal satellite images, climate changes, test sites, landscape analysis.

The research was supported by the grants of RFBR by the projects no. 16–35–50143 and 15–45–00075.

REFERENCES

1. Zimov S.A., Voropaev Y.V., Semiletov I.P., Davidov S.P., Prosiannikov S.F., Chapin F.S., Chapin M.C., Trumbore S., Tyler S. North Siberian lakes: a methane source fuelled by Pleistocene Carbon. *Science*, 1997, vol. 277, no. 5327, pp. 800–802.
2. IPCC, 2007. Otchet Mexhpravitelstvennoy gruppy ekspertov po izmeneniyam klimata [Report of the Intergovernmental group of experts on climate changes]. Available at: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf (accessed 10 May 2016).
3. Viktorov A.S., Kapranova V.N., Trapeznikova O.N. Mathematical model of lacustrine-thermokarst plain morphostructure under the changing climatic conditions. *Cryosphere of Earth*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 26–34. In Rus.
4. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting. *International Journal of Environmental Studies*, 2009, vol. 66, no. 4, pp. 423–431.
5. 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. *Cryosphere of Earth*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 114–120. 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 Y., Kirpotin S., Bryksina N. Remote study of thermokarst lakes dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 5. In: *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems*. Ed. by O. Pokrovsky. NY, Nova Science Publishers, 2014. pp. 173–204.
8. Dneprovskaya V.P., Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Study of thermokarst changes in discontinuous permafrost zone of Western Siberia based on space images. *Study of Earth from Space*, 2009, no. 4, pp. 88–96. In Rus.
9. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettermaier D.P., Polishchuk Y.M., Savichev O.G., Smith L.C. *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Ch. 4. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht; Heidelberg; New-York; London, Springer, 2013. pp. 111–154.
10. 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*. Fairbanks, Alaska, June 29 – July 3, 2008. pp. 551–556.
11. Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images. *J. Geophys. Res.*, 2006, vol. 111, pp. 1–11. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005JG000150/pdf> (accessed 3 April 2016).
12. Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, vol. 14, pp. 19–27.

13. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalén, Northern Sweden, especially 1960–1997. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, vol. 11, pp. 55–69.
14. 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, no. 8, pp. 565–583.
15. Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu., Bryksina N.A., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S. Methodical issues for evaluating methane reserves in small thermokarst lakes in the permafrost of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 127–135. In Rus.
16. 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, pp. 1657–1676.
17. Landshaftnaya karta SSSR [Landscape map of the USSR]. Ed. by I.S. Gudilin. Moscow, Moscow State University Press, 1987. Available at: http://www.landscape.edu.ru/science_maps.shtml/ (accessed 3 April 2016).
18. Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu. Imitation modeling of thermokarst lakes fields in permafrost. *Information systems and technologies*, 2011, no. 1, pp. 53–60. In Rus.
19. 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, pp. 1–7.
20. 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.
21. Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes. *Science*, 2005, vol. 308, no. 3, pp. 1429.

Received: 14 June 2016.

Information about the authors

Natalia A. Bryksina, Cand. Sc., senior researcher, Kant Baltic Federal University.

Yury M. Polishchuk, Dr. Sc., principal researcher, Institute of Petroleum Chemistry.