

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАЛЫХ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО СНИМКАМ КН-7 И ГЕОЕУЕ-1

О. А. Байсаямова, А. Н. Богданов, И. Н. Муратов, Ю. М. Полищук, М. С. Снигирева

Введение

В настоящее время проводятся обширные исследования эмиссии парниковых газов в атмосферу из водных объектов в болотно-тундровых ландшафтах в северных широтах планеты. Мерзлота, являясь хранилищем законсервированного углерода в обширных мерзлых торфяных болотах севера Евразии и Америки, при потеплении климата может стать источником возникновения еще большего потепления при высвобождении парниковых газов [1]. По данным [2], наиболее активным источником эмиссии метана и углекислого газа в арктических и субарктических районах Западной Сибири являются малые термокарстовые озера с площадью менее 0,1-0,2 га.

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

В настоящее время в дистанционных исследованиях распределения озер преимущественно используются снимки среднего разрешения Landsat, не позволяющие дешифрировать малые озера. В [3] такие исследования малых термокарстовых озер проведены с применением снимков сверхвысокого разрешения. Однако в [3] не исследован вид закона распределения, что явилось основной целью данной работы на примере малых озер криолитозоны Западной Сибири.

Методы и данные

Для проведения исследований использованы снимки сверхвысокого разрешения с аппаратов Key Hole – 7 (КН-7) и GeoEye-1. Спутник КН-7 использовался в период 1963 – 1967 гг. в американской разведывательной программе «Gambit» [3], спутниковые снимки с разрешением 0,6 м были рассекречены и переданы в свободный доступ в 2002 г. Космический аппарат GeoEye-1, запущенный в 2008 году, обеспечивает ежедневное получение космических снимков также с разрешением 0,6 м.

Исследования проводились с использованием метода тестовых участков. На территории исследований в пределах зон прерывистой и островной мерзлоты Западной Сибири выбраны 6 тестовых участков (ТУ), схема расположения которых приведена на рис. 1, где показано, согласно [4], расположение зон прерывистого и островного распространения мерзлоты на территории Западной Сибири.

Как видно на рис. 1, исследованные ТУ располагаются в меридиональном направлении в диапазоне широт приблизительно от 61 до 65 град. с.ш. Участки ТУ-1 и ТУ-2 размещены в зоне прерывистой мерзлоты, остальные ТУ – в зоне островного распространения мерзлоты. Характеристика тестовых участков дана в табл. 1.

Характеристика тестовых участков

Номер ТУ	Координаты центра ТУ	Зона мерзлоты	Площадь участка, га
ТУ-1	70°56' 00"E 61°59'57"N	островная	796
ТУ-2	71°6'20"E 62°1'30"N	островная	2120
ТУ-3	72°14'16"E 64°58' 20"N	островная	1271
ТУ-4	71°33'36"E 63°18'37"N	островная прерывистая	389
ТУ-5	71°37'56"E 63°35'29"N	прерывистая	4176
ТУ-6	71°43'10"E 64°3'6"N	прерывистая	3890

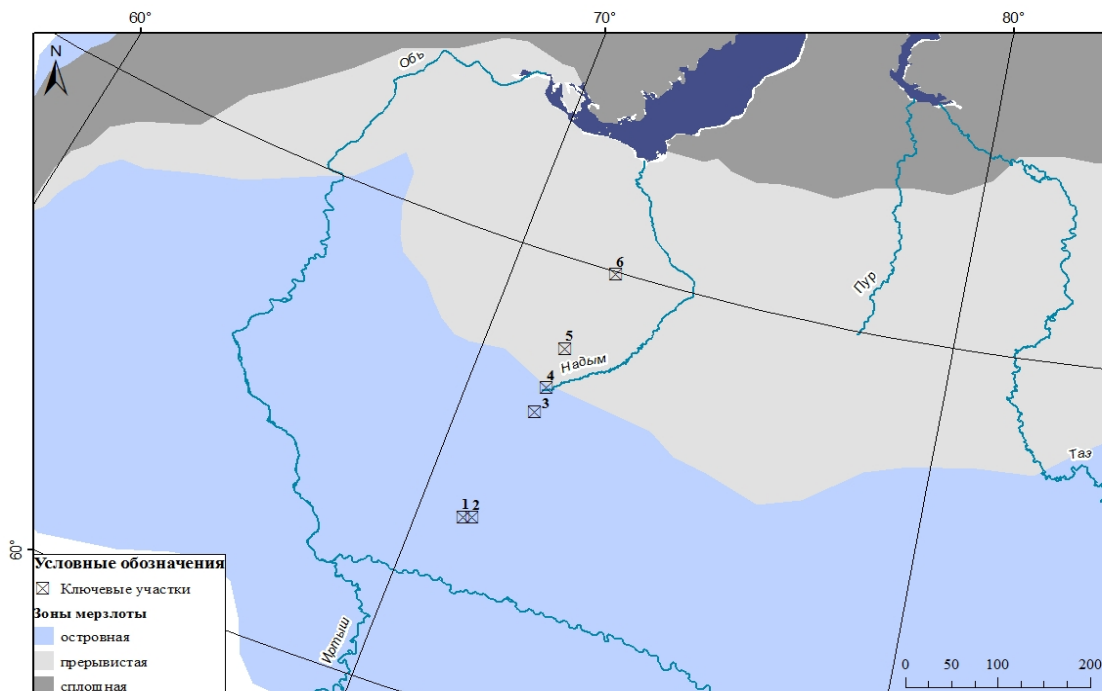


Рис. 1. Карта-схема геокриологического районирования Западной Сибири с указанным местоположением тестовых участков

Материалы съемки со спутника КН-7 являются сканированными цифровыми копиями фотопленок, что затрудняет автоматическое дешифрирование снимков. Поэтому выделение озер на снимках проводилось вручную путем визуального дешифрирования. Минимальный размер озер, выделяемых по снимкам КН-7 и GeoEye-1, ограничивался величиной 100 м² для всех тестовых участков для обеспечения сопоставимости и повышения достоверности результатов статистической обработки полученных данных.

На основе полученных результатов измерения площадей этих озер по космическим снимкам и определения числа озер для каждого тестового участка были рассчитаны суммарная (общая) площадь озер ($S_{сум}$) на тестовом участке, плотность озер и заозеренность территории. Степень заозеренности территории определялась в виде $S_{сум}/S_o$, где S_o – площадь тестового участка, а плотность озер – как отношение n/S_o , где n – число озер на тестовом участке.

Результаты и их обсуждение

Результаты расчетов рассматриваемых характеристик представлены в табл. 2, из которой видно, что тестовые участки значительно различаются по степени заозеренности, числу и суммарной площади озер.

Таблица 2

Результаты обработки снимков КН-7 и GeoEye-1

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

На основе полученных данных был проведен анализ изменения площадей термокарстовых озер во времени. Для этого на каждом из тестовых участков были рассчитаны суммарные площади озер в начальный (S_n) и конечный (S_k) годы наблюдений и определены относительные величины их изменения за период наблюдения по формуле:

$$R = \frac{S_k - S_n}{S} \cdot 100\% . \quad (2)$$

Как видно из табл.2, на исследованной территории за прошедший 50-летний период при значительном росте численности озер в среднем наблюдается снижение площадей озер и степени заозеренности территории, что можно объяснить, в соответствии с [5], ускоренным образованием новых термокарстовых озер в условиях продолжающегося глобального потепления.

Изучены распределения озер по их размерам с использованием данных о числе озер и их площадях. На рис. 2 и 3 приведены графики семейства гистограмм распределения озер по площадям в двойном логарифмическом масштабе на 6 тестовых участках по снимкам КН-7 и GeoEye-1. Такое представление графиков 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 гистограмм,
 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 относительного числа озер от их площадей на графиках гистограмм, представленных в двойном логарифмическом масштабе. На рис. 2 и 3 приведены гистограммы распределения озер по площадям в двойном логарифмическом масштабе, полученные на всех ТУ по снимкам КН-7 и GeoEye-1 соответственно,

которые допускают степенную аппроксимацию с достаточно высоким уровнем коэффициента детерминации.

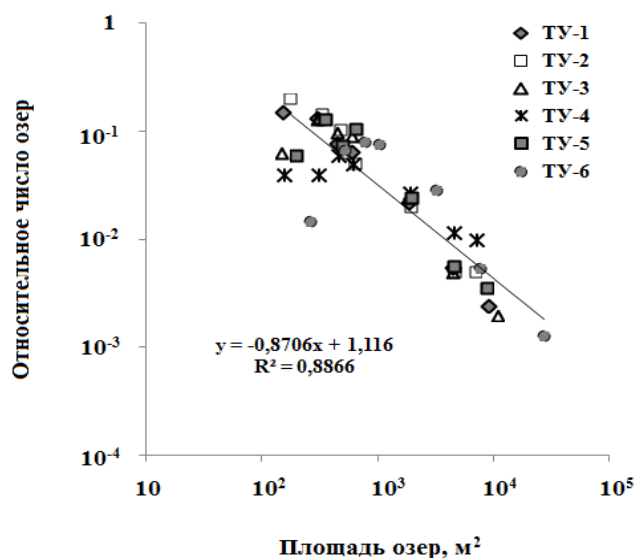


Рис. 2. Распределение озер по размерам на разных ТУ по снимкам КН-7

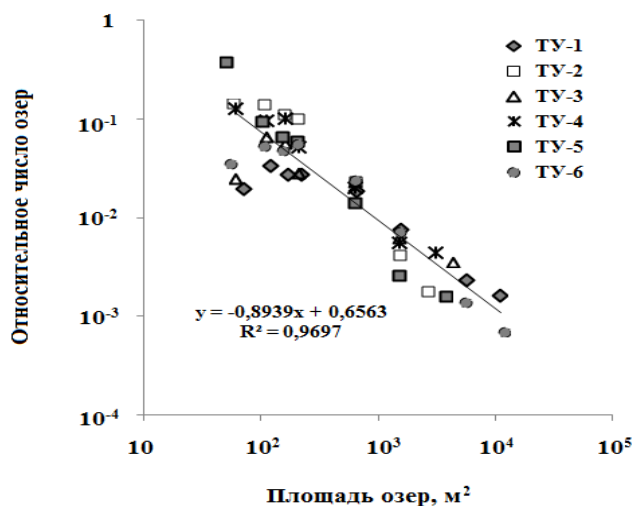


Рис. 3. Распределение озер по размерам на разных ТУ по снимкам GeoEye

Как видно из рис. 2 и 3, несмотря на существенные различия в плотности озер и степени заозеренности территорий на разных ТУ (см. табл. 2), графики гистограмм распределений озер по их размерам на всех ТУ достаточно близки друг к другу, что свидетельствует о достаточно высокой степени близости эмпирических распределений малых термокарстовых озер на разных тестовых участках. Следовательно, можно принять, что распределение малых озер с площадями от 100 м^2 до 1 га в зонах прерывистого и островного распространения мерзлоты Западной Сибири достаточно хорошо описывается степенной функцией, что подтверждает результаты исследований распределения малых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири, полученные в [6] с использованием снимков другого космического аппарата QuickBird.

Работа поддержана в рамках проекта по договору с Минобрнауки РФ № 14. В25.31.0001 (BIO-CLIM-LAND) от 23.06.2013 г. и при поддержке гранта РФФИ по проекту 15-45-00075-р_урал_a

Литература

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. – Vol. 277. – P. 800–802.
2. 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.
3. Богданов, А. Н., Полищук, Ю. М. Дистанционное исследование пространственного распределения малых озер в зонах активного термокарста Западной Сибири // *Вестник ЮГУ*. – 2014. – Вып. 3. – С.11–14.
4. Атлас СССР (Ред. Т.П.Сидоренкова). – М.: Главное управление геодезии и картографии при СМ СССР, 1984. – 260 с.
5. 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.
6. Полищук, Ю. М., Брыксина, Н. А., Полищук, В. Ю. Дистанционный анализ изменения числа и распределения по размерам малых термокарстовых озер криолитозоны Западной Сибири // *Исследование Земли из космоса*. – 2015. – № 3. – С. 34–42.