

И. Н. Муратов

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЛАНДШАФТНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛЕЙ  
МАЛЫХ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР В ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ АРКТИКЕ  
НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ КАНОПУС-В**

Работа выполнена при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
(договоры № 18-47-700001, № 18-45-860002 и № 18-45-703001),  
Администрации Томской области  
и Департамента образования и молодежной политики ХМАО–Югры.

*Проведены дистанционные исследования по снимкам высокого разрешения Канопус-В на 30 тестовых участках, расположенных достаточно равномерно на территории Арктической зоны Западной Сибири. Получены данные о числе озер и их площадях на каждом тестовом участке. Количество озер изменяется от 135 до 1620 на разных тестовых участках, а площади озер – в пределах от 40 м<sup>2</sup> до 400 га. Исследованы изменения характеристик полей малых термокарстовых озер в зависимости от ландшафтного районирования. Изменения плотности озер, их суммарной площади на тестовых участках и заозеренности территории в арктической и в северной субарктической ландшафтных зонах в среднем выражены довольно слабо, но при переходе в южную субарктическую зону их величины показывают значительный рост, что может свидетельствовать о различной интенсивности термокарстовых процессов в разных ландшафтных зонах.*

*Ключевые слова: вечная мерзлота, геоинформационные системы, термокарстовые озера, спутниковые снимки, ландшафтный анализ, тестовые участки.*

I. N. Muratov

**USING GEOINFORMATION TECHNOLOGIES FOR THE STUDY  
OF SMALL THERMOKARST LAKES FIELDS IN THE WESTERN SIBERIA  
ARCTIC BASED ON SATELLITE IMAGES OF KANOPUS-V**

*Remote studies were performed with use of high-resolution images Kanopus-V at 30 test sites, located fairly evenly on the territory of the Arctic zone of Western Siberia. Data were obtained on the number of lakes and their areas in each test site. The number of lakes varied in different test sites from 135 to 1620, and the area of lakes is from 40 m<sup>2</sup> to 400 hectares. Changes in the characteristics of the fields of small thermokarst lakes are studied depending on the landscape zoning. Changes in the density of lakes, their total area in the test areas and limnicity in the Arctic and northern subarctic landscapes are on average quite poorly expressed, but when they move to the southern subarctic zone, their values show a significant increase, which may indicate a difference in the intensity of thermokarst processes in different landscape areas.*

*Keywords: permafrost, geoinformation systems, thermokarst lakes, satellite images, landscape analysis, test areas.*

---

## **Введение**

В последние десятилетия пристальное внимание исследователей занимает проблема парникового эффекта, рассматриваемого в качестве одного из факторов повышения среднегодовой температуры на планете – глобального потепления. Важность этих исследований подтверждается решениями Парижского климатического саммита (2015) о разработке мероприятий, позволяющих не допустить повышение среднегодовой температуры на Земле более чем на 2 °С. Парниковый эффект вызывается ростом объемов поступления в атмосферу парниковых газов, главными из которых являются углекислый газ и метан. Метан является одним из наиболее важных парниковых газов благодаря высокому потенциалу глобального потепления, по величине которого он, по данным [1], превышает углекислый газ. В работах [2–5] показано, что на территориях севера наибольшее количество метана выделяется в атмосферу из болот и озерно-термокарстовых равнин. Доказано [6], что ¼ часть мировых запасов метана законсервирована на территории Западной Сибири, основную часть которой занимают болотно-озерные ландшафты.

По оценкам [7, 8], наиболее интенсивное выделение метана в арктических и субарктических районах происходит из малых озер термокарстового происхождения. Вследствие труднодоступности территорий в зоне мерзлоты эти исследования малых термокарстовых озер проводятся дистанционными методами с применением спутниковых снимков. К территориям, на которых проведены исследования озер термокарстового происхождения с использованием дистанционных методов, относятся: Сибирь, Скандинавия, Аляска и другие регионы Арктической зоны [9–12]. В основном исследования проводились по снимкам Landsat среднего пространственного разрешения, на которых выделяются только крупные озера. Данные снимки позволили изучить флуктуации численности и размеров озер в интервале нескольких десятилетий [13–15] и распределения озер по размерам, необходимые для оценки запасов метана в озерах [16–19].

Однако на снимках Landsat не видны малые озера (с размерами менее 0,05–0,1 га), концентрация метана в воде которых, по данным [7, 8, 19, 20], более чем на порядок превышает его концентрацию в больших озерах. Это приводит к необходимости использовать снимки высокого пространственного разрешения [21, 22] для изучения полей малых термокарстовых озер. Исследования, направленные на изучение ландшафтных особенностей термокарстово-озерных равнин в зоне мерзлоты, например [23, 24], выполнены также с использованием снимков Landsat.

Для оценки вклада миллионов малых озер в общий объем запасов метана на обширных территориях Северной Евразии необходимо при моделировании динамики термокарстовых озерных полей учитывать ландшафтные особенности полей термокарстовых озер с использованием наземных и дистанционных методов исследования (по космическим снимкам высокого разрешения). Из-за труднодоступности территорий Арктики наземные исследования очень трудоемки и дорогостоящи, в то время как дистанционные исследования менее затратные. Насколько нам известно, дистанционные исследования ландшафтных особенностей распределения полей термокарстовых озер по снимкам высокого разрешения ранее не проводились, что и определило цель данной работы.

## **Данные и методы исследования**

Район проведения исследований – зона сплошной мерзлоты Западной Сибири. В исследовании использовались космоснимки высокого разрешения (разрешение 2 м) в количестве 26 штук. Из-за сравнительно малой полосы захвата снимки Канопус-В не обеспечивают полного покрытия исследуемой территории, что потребовало использования в исследованиях метода тестовых (ключевых) участков. Для проведения дистанционных исследований тестовые участки (ТУ) выбирались в границах сцен космических снимков в местах активного термокарста [25], определяемого по наибольшему сгущению озер. Для этого использовалась

карта зон активного термокарста Западной Сибири, геоинформационная технология построения которой изложена в [26].

Выбранные ТУ находились на территории трех ландшафтных зон, располагающихся на территории сплошного распространения мерзлоты. Общая характеристика выбранных тестовых участков приведена в таблице 1, а их расположение дано на рисунке 1, где цифрами обозначены номера ТУ. На рисунке, в соответствии с [27], показано расположение ландшафтных зон на территории исследования. Тестовые участки распределялись равномерно на территории исследования, в соответствии с картой ландшафтного зонирования территории Западной Сибири. На рисунке 1 показана схема размещения тестовых участков, по которой видно, что участки распределены равномерно по территории исследований (приблизительно пропорционально площадям ландшафтных зон).

Таблица 1 – Характеристика размещения тестовых участков на территории исследований

Ландшафтная зона	Количество ТУ	Номера ТУ	Средняя площадь ТУ, га	Период съемки
Арктическая тундра	5	1–5	3142	2013–2015
Субарктическая северная тундра	15	6–20	3155	2013–2015
Субарктическая южная тундра	10	21–30	3023	2013–2015

Для определения числа и площадей малых озер использовались снимки высокого разрешения Канопус-В. Дешифрирование этих снимков проведено с использованием алгоритма бинарной классификации (инструмент «Переклассификация» в составе ArcGIS 10.3). Алгоритм бинарной классификации основывается на визуальном установлении некоего порогового значения спектральной яркости, с помощью которого выделяются два класса: «вода» и «не вода». Пороговые значения устанавливались отдельно для каждого тестового участка вследствие различий в параметрах снимков. Обработываемые панхроматические снимки имеют сильный контраст водной поверхности с окружающей растительностью, что визуально позволяет определить приемлемые пороговые значения для классификации водных объектов. При этом мох и растительность под водой не обнаруживаются, а растительность и мох по берегам, не являющиеся «водой», также не оказывают заметного влияния на определяемую площадь водной поверхности озера.

При дешифрировании снимков Канопус-В минимальный размер озера был выбран  $40 \text{ м}^2$  исходя из следующих соображений. При пространственном разрешении снимков (2 м) размер пикселя изображения равен  $2 \text{ м} \times 2 \text{ м}$  ( $4 \text{ м}^2$ ), что позволяет на площади  $40 \text{ м}^2$  выделять 10 пикселей, что достаточно для надежной идентификации озер на фоне цифрового шума на снимке. Космические снимки дешифрировались с использованием лицензионного программного обеспечения ArcGIS 10.3. В работе использованы снимки высокого пространственного разрешения Канопус-В, на которых были выделены 30 тестовых участков, равномерно расположенных на территории Арктической зоны Западной Сибири. Использованные снимки получены в течение достаточно короткого периода (2013–2015 гг.). Следовательно, использованные снимки можно рассматривать свободными от возможного влияния климатических изменений.

В результате получены два массива данных о числе озер и их площадях на каждом тестовом участке. Для проведения анализа на каждом ТУ были выделены от 135 до 1620 озер, а их площади изменялись в пределах от  $40 \text{ м}^2$  до 400 га.

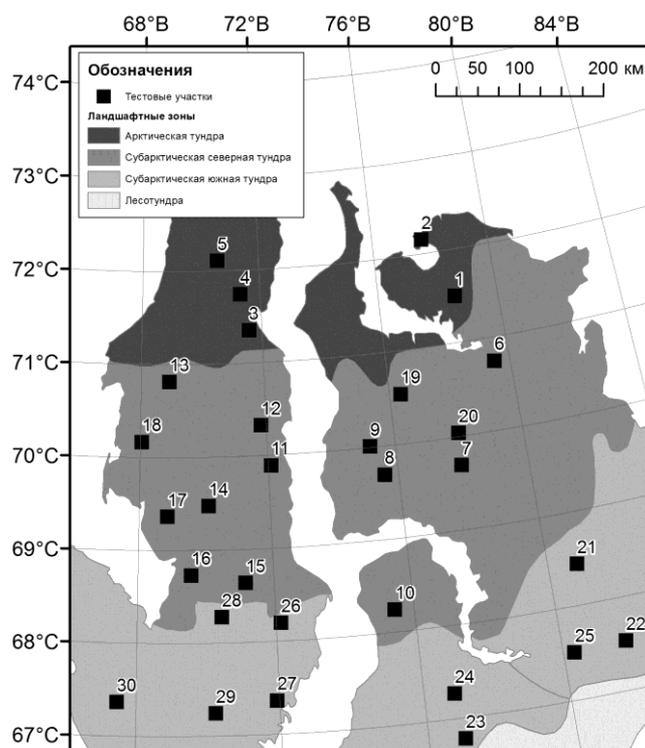


Рисунок 1 – Схема пространственного размещения тестовых участков в Арктической зоне Западной Сибири

### Результаты исследования свойств полей термокарстовых озер

Основные характеристики полей термокарстовых озер на исследуемой территории по результатам дистанционного определения числа озер и их площадей по снимкам высокого разрешения даны в таблице 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.

Таблица 2 – Характеристики полей термокарстовых озер

ТУ	Число озер	Общая площадь озер, га	Плотность озер, га <sup>-1</sup>	Степень заозеренности, %
1	135	542	0,04	17
2	330	703	0,11	23
3	455	441	0,14	14
4	388	572	0,12	18
5	312	389	0,10	12
6	176	218	0,06	7
7	524	649	0,16	19
8	181	254	0,06	8
9	651	418	0,23	14
10	650	474	0,20	14
11	166	434	0,05	13
12	364	752	0,11	23
13	504	429	0,15	13
14	388	469	0,13	16
15	323	522	0,11	17
16	530	499	0,17	16
17	185	382	0,06	12
18	237	662	0,07	20
19	355	566	0,12	19

20	475	583	0,15	18
21	1130	671	0,37	22
22	554	711	0,18	23
23	873	599	0,32	22
24	1602	732	0,53	24
25	461	485	0,14	15
26	200	416	0,07	14
27	540	622	0,18	20
28	550	686	0,19	24
29	450	657	0,15	21
30	187	803	0,06	26
<b>Среднее</b>	<b>463</b>	<b>545</b>	<b>0,15</b>	<b>18</b>

Таблица показывает высокую вариативность количества озер на тестовых участках. На каждом участке может быть от сотен до нескольких тысяч озер. Показатель заозеренности территории изменяется в интервале от 7 до 26 %, со средним значением 18 %. Коэффициент плотности озер меняется на разных тестовых участках в широких пределах – разница в плотности озер между участками может изменяться на порядок.

Приведенные в таблице 2 данные о характеристиках озер позволяют изучить закономерности изменения свойств полей малых термокарстовых озер криолитозоны Западной Сибири в зависимости от ландшафтных особенностей исследуемой территории. Для этого были использованы средние значения исследуемых характеристик, рассчитанных как среднеарифметические величины по всем ТУ, находящимся в каждой ландшафтной зоне. Зависимость числа озер, общей площади и степени заозеренности территории, в разных ландшафтных зонах представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики полей термокарстовых озер в разных ландшафтных зонах

Ландшафтная зона	Число озер	Общая площадь озер, га	Заозеренность, %
Арктическая тундра	324	529	17
Субарктическая северная тундра	381	487	15
Субарктическая южная тундра	655	638	21

Указанные характеристики при переходе из одной ландшафтной зоны в другую проявляют заметные изменения, причем они демонстрируют сходный характер зависимости, а именно: в арктической и в северной субарктической ландшафтных зонах их изменения выражены довольно слабо, а при переходе в южную субарктическую зону их величины показывают значительный рост, что проиллюстрировано на рисунке 2.

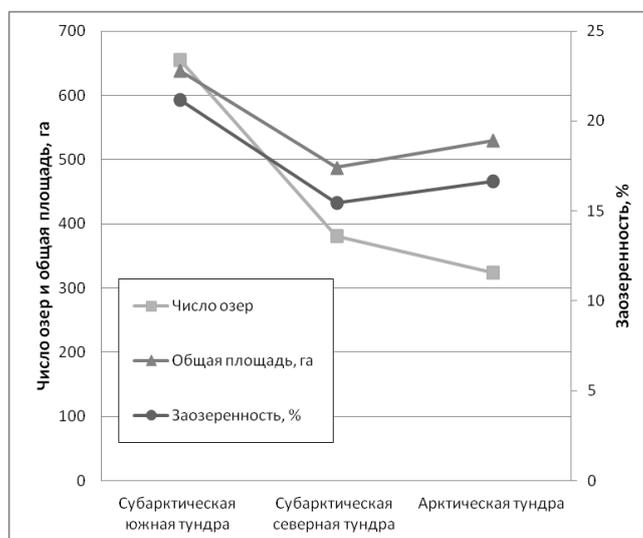


Рисунок 2 – График изменения характеристик полей озер в зависимости от ландшафтных зон

Сходный характер поведения этих трех характеристик, по нашему мнению, обусловлен показанным на графике ростом числа озер в южной субарктической ландшафтной зоне, который сопровождается увеличением суммарной площади озер и, следовательно, степени заозеренности территории в этой зоне по сравнению с другими зонами. К сожалению, на основе дистанционных данных не представляется возможным объяснить причины существенного роста рассматриваемых характеристик полей термокарстовых озер в южной субарктической зоне, так как эти данные не позволяют раскрыть внутренние механизмы развития термокарстовых процессов, определяющих особенности изменения полей термокарстовых озер. Для объяснения причин изменений характеристик полей озер в зависимости от ландшафтного зонирования, по нашему мнению, необходимы дополнительные комплексные геокриологические, геологические и физико-географические исследования термокарстовых процессов на территории криолитозоны.

### Заключение

В статье рассмотрены вопросы проведения дистанционных исследований основных характеристик полей малых термокарстовых озер в арктической, северной и южной субарктических ландшафтных зонах на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири. Исследования проведены с использованием 26 космических снимков высокого пространственного разрешения Канопус-В, позволивших определить число и измерить площади термокарстовых озер на 30 тестовых участках. С использованием этих данных определены основные характеристики полей термокарстовых озер в разных ландшафтных зонах: плотность озер на единичной площади (1 га), суммарная площадь озер и заозеренность территории. На основе проведенного анализа установлено, что в арктической и в северной субарктической ландшафтных зонах изменения характеристик полей озер выражены довольно слабо, а при переходе в южную субарктическую зону их величины показывают значительный рост, что может свидетельствовать о разной интенсивности протекания термокарстовых процессов в различных ландшафтных зонах на территории многолетней мерзлоты.

### Литература

1. Кароль, И. Л. Оценки характеристик относительного вклада парниковых газов в глобальное потепление климата [Текст] / И. Л. Кароль // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 11. – С. 5–12.
2. Walter, K. M. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget [Text] / K. M. Walter, L. C. Smith, F. S. Chapin // Phil. Trans. R. Soc. – 2007. – Vol. 365. – P. 1657–1676.
3. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budget and CH<sub>4</sub> emissions [Text] / D. Bastviken, J. J. Cole, M. L. Pace [et al.] // J. of Geoph. Res. – 2008. – Vol. 113. – G02024.
4. Methane dynamics in different boreal lake types [Text] / S. Juutinen, M. Rantakari, P. Kortelainen [et al.] // Biogeosciences. – 2009. – № 6. – P. 209–223.
5. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH<sub>4</sub> flux up-scaling [Text] / A. F. Sabrekov, B. R. K. Runkle, M. V. Glagolev [et al.] // Environ. Res. Lett. – 2014. – № 9. – P. 1–9.
6. Глобальные изменения климата: «метановая бомба» – наукообразный миф или потенциальный сценарий? [Текст] / А. И. Жилиба, Г. А. Вандышева, К. Г. Грибанов [и др.] // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. – 2011. – Т. 2. – № 1. – С. 3–16.
7. Pokrovsky, O. S. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia [Text] / O. S. Pokrovsky, L. S. Shirokova, S. N. Kirpotin // Biogeosciences. – 2011. – Vol. 8. – P. 565–583.

8. Holgerson, M. A. Large contribution to inland water CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from very small ponds [Text] / M. A. Holgerson, P. A. Raymond // *Nature Geoscience*. – 2016. – № 9. – P. 222–226.
9. Spatial Extent, Age, and Carbon Stoks in Drained Thaw Lake Basins on the Barrow Peninsula [Text] / K. M. Hinkel, W. R. Eisner, J. G. Bockheim [et al.] // *Alaska. Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. – 2003. – Vol. 35. – № 3. – P. 291–300.
10. Luoto, M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland [Text] / M. Luoto, M. Seppala // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2003. – Vol. 14. – P. 19–27.
11. Кравцова, В. И. Распространение термокарстовых озер в России [Текст] / В. И. Кравцова // *Вестник Московского университета*. – 2009. – № 3. – С. 33–42.
12. Анализ развития морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин на основе математической модели [Текст] / А. С. Викторов, В. П. Капралова, Т. В. Орлов [и др.] // *Геоморфология*. – 2015. – № 3. – С. 3–13.
13. Кравцова, В. И. Изменения размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет [Текст] / В. И. Кравцова, А. Г. Быстрова // *Криосфера Земли*. – 2009. – Т. 13, № 2. – С. 16–26.
14. Брыксина, Н. А. Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков [Текст] / Н. А. Брыксина, Ю. М. Полищук // *Криосфера Земли*. – 2015. – Т. 19, № 2. – С. 114–120.
15. Polishchuk, Y. M. Remote analysis of changes in the number and distribution of small thermokarst lakes by sizes in Cryolithozone of Western Siberia [Text] / Y. M. Polishchuk, N. A. Bryksina, V. Y. Polishchuk // *Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2015. – Vol. 51. – № 9. – P. 999–1006.
16. Downing, J. A. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments [Text] / J. A. Downing, Y. T. Prairie // *Limnol. Oceanogr*. – 2006. – Vol. 51. – P. 2388–2397.
17. Karlsson, J. M. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia [Text] / J. M. Karlsson, S. W. Lyon, G. Destouni // *Remote sensing*. – 2014. – № 6. – P. 621–636.
18. Polishchuk, V. Y. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6 [Text] / V. Y. Polishchuk, Y. M. Polishchuk // *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems* / Ed. by O. Pokrovsky. – NY: Nova Science Publishers. – 2014. – P. 205–234.
19. Викторов, А. С. Математическая модель морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин в изменяющихся климатических условиях [Текст] / А. С. Викторов, В. П. Капралова, О. Н. Трапезникова // *Криосфера Земли*. – 2015. – Т. 19, № 2. – С. 26–4.
20. Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озерах в зоне мерзлоты Западной Сибири [Текст] / Ю. М. Полищук, В. Ю. Полищук, Н. А. Брыксина [и др.] // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326, № 2. – С. 127–135.
21. Полищук, Ю. М. Методические вопросы построения обобщенных гистограмм распределения площадей озер в зоне мерзлоты на основе космических снимков среднего и высокого разрешения [Текст] / Ю. М. Полищук, А. Н. Богданов, И. Н. Муратов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2016. – Т. 13, № 6. – С. 224–232.
22. Полищук, Ю. М. Исследование полей малых термокарстовых озер в зоне сплошной мерзлоты Западной Сибири по спутниковым снимкам высокого разрешения [Текст] / Ю. М. Полищук, И. Н. Муратов, В. Ю. Полищук // *Оптика атмосферы и океана*. – 2016. – Т. 29, № 7. – С. 592–597.
23. Брыксина, Н. А. Ландшафтно-космический анализ динамики полей термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири [Текст] / Н. А. Брыксина,

Ю. М. Полищук, В. И. Булатов // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2012. – № 7. – С. 153–157.

24. Брыксина, Н. А. Ландшафтно-геокриологический анализ изменения количества озер на территории Западной Сибири с использованием космических снимков [Текст] / Н. А. Брыксина, Ю. М. Полищук // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2016. – № 5. – С. 37–45.

25. Викторov, А. С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта [Текст] / А. С. Викторov. – Москва : Наука. – 2006. – 252 с.

26. Полищук, Ю. М. Зоны активного термокарста на территории многолетней мерзлоты и их выявление по космическим снимкам [Текст] / Ю. М. Полищук, А. Н. Богданов // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 12. – С. 104–114.

27. Ландшафтная карта СССР [Электронный ресурс] / под ред. И. С. Гудилина. – URL: <https://www.twirpx.com/file/1494034/>. (дата обращения: 17.01.2016).