

Дистанционные исследования извилистости береговых границ термокарстовых озёр Большеземельской тундры по снимкам «Канопус-В»

Ю. М. Полищук, И. Н. Муратов, О. А. Байсалямова

*Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий
Ханты-Мансийск, 628011, Россия
E-mail: yupolishchuk@gmail.com*

Статья посвящена вопросам использования снимков высокого разрешения для исследования свойств извилистости береговых границ термокарстовых озёр в зоне многолетней мерзлоты Большеземельской тундры. Дистанционные исследования проведены на 20 тестовых участках, расположенных достаточно равномерно на территории Арктической зоны России. Для описания извилистости использован показатель формы пространственных объектов, принятый в картоведении, который рассчитывается по результатам измерения площади и периметра озёр по спутниковым снимкам. Показано, что степень извилистости озёрных границ проявляет в среднем положительный линейный тренд с ростом площади озёр. Построена гистограмма распределения степени извилистости береговых границ озёр в интервале площадей от 50 м² до 50 га, позволяющая исследовать закономерности распределения термокарстовых озёр в широком диапазоне их размеров. Результаты могут быть использованы в задачах моделирования полей термокарстовых озёр и оценки объёмов эмиссии парниковых газов из озёр Арктической зоны.

Ключевые слова: дистанционные методы, космические снимки, геоинформационные системы, многолетняя мерзлота, Большеземельская тундра, термокарстовые озёра, извилистость береговых линий озёр

Одобрена к печати: 23.04.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-95-101

Введение

В условиях современных климатических изменений важной является проблема моделирования и прогноза объёмов эмиссии парниковых газов на территории Арктической зоны как района сосредоточения термокарстовых озёр — интенсивных источников эмиссии природного метана в атмосферу. Известно (Holgerson, Raymond, 2016; Polishchuk et al., 2018), что масса накопленного в озёрах метана, а следовательно, и его эмиссия в атмосферу, определяется пространственными свойствами полей озёр. Ввиду труднодоступности и высокой степени заболоченности территорий в арктических регионах исследования термокарстовых озёр и других поверхностных водоёмов как важных источников эмиссии парниковых газов в атмосферу в зонах мерзлоты проводятся с использованием дистанционных методов.

Проведённые в последнее время многочисленные дистанционные исследования динамики численности и размеров термокарстовых озёр в Северной Америке и Северной Евразии (Кравцова, Быстрова, 2009; Kirpotin et al., 2009; Luoto, Seppala, 2003; Riordan et al., 2006; Zuidhoff, Kolstrup, 2000) позволили создать геоимитационную модель динамики их полей (Полищук, Полищук, 2016; Polishchuk, Polishchuk, 2014), пригодную для формирования прогнозных оценок динамики накопления озёрного метана.

Пространственная структура этой модели определяется совокупностью окружностей, расположение и размеры которых являются случайными (Polishchuk, Polishchuk, 2014). Как показали дистанционные исследования пространственной изменчивости формы контуров (извилистости береговых линий) реальных озёр (Полищук, Полищук, 2012, 2013; Polishchuk et al., 2019), проведённые в различных зонах мерзлоты (сплошная, прерывистая и островная) Западной Сибири, форма их контуров в большинстве случаев отличается от окружности. Для

иллюстрации на *рис. 1* представлен фрагмент дешифрированного космического снимка спутника «Канопус-В», демонстрирующий обилие термокарстовых озёр на сравнительно небольшом участке исследуемой территории.

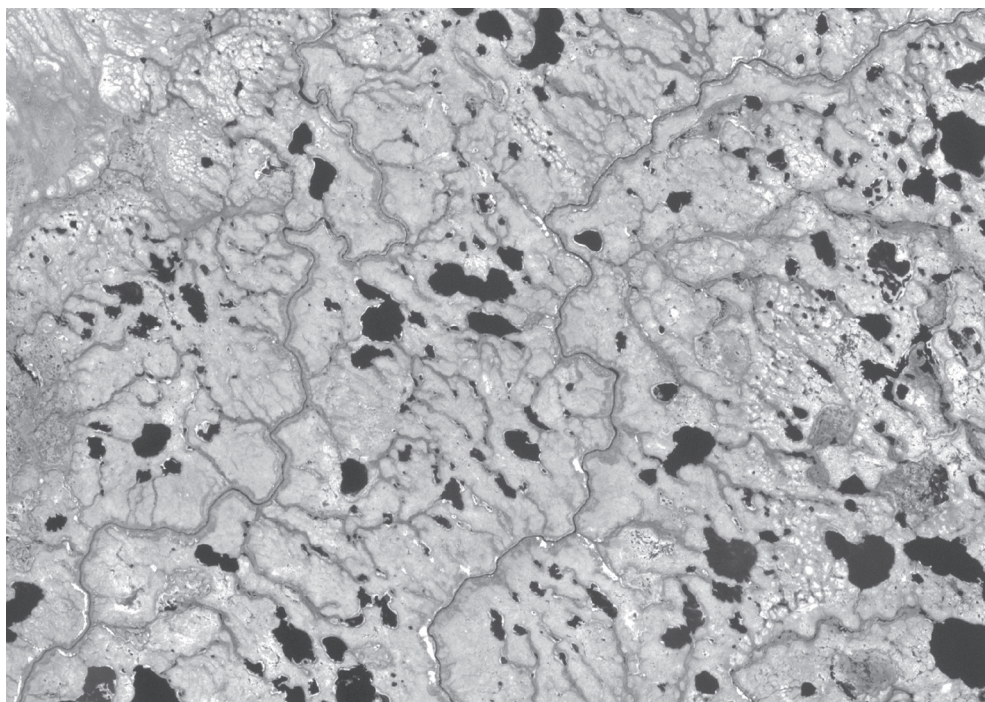


Рис. 1. Фрагмент космического снимка спутника «Канопус-В» (04.07.2018) с изображением озёр Большеземельской тундры

Как видно на *рис. 1*, контуры береговых линий практически всех реальных термокарстовых озёр принимают разнообразные формы, в той или иной степени отличающиеся от окружности, которая была использована в геоимитационной модели. Как показано в работе (Кочергин и др., 2018), извилистость береговых границ приводит к ошибкам дистанционного измерения площадей озёр по космическим снимкам, а следовательно, и к ошибкам в расчётных объёмах эмиссии метана из них. Согласно указанному исследованию, величина этих ошибок зависит как от соотношения разрешающей способности снимка и размеров озёр, так и от степени извилистости границ озёр. Потепление климата последних десятилетий привело к значительному ускорению термокарстовых процессов в зоне многолетней мерзлоты, что может вызвать рост концентрации метана в термокарстовых озёрах. Поэтому важной является проблема исследования извилистости береговых границ термокарстовых озёр на разных арктических территориях. Пока данные об извилистости озёр в широком диапазоне их размеров имеются только для территории Арктической зоны Западной Сибири (Полищук и др., 2019). В связи с этим целью работы стало изучение извилистости береговых границ озёр в зависимости от их размеров и закономерностей распределения степени извилистости береговых линий арктических озёр на территории северо-востока Европейской части России с использованием снимков высокого разрешения.

Данные и методы исследования

Рассмотрим методические вопросы проведения экспериментальных исследований пространственной изменчивости береговых границ (извилистость границ) по спутниковым снимкам высокого разрешения. Исследования озёр в настоящей работе проводились в криолитозоне Большеземельской тундры (северо-восток Европейской части России) с использованием кос-

мических снимков высокого разрешения спутника «Канопус-В» (разрешение — 2,1 м). Все снимки выбирались в достаточно короткий период летнего сезона (конец июня — август) для минимизации влияния сезонных колебаний уровня воды в озёрах. В этот период полностью исчезает ледовый покров на озёрах, мешающий их выделению при дешифрировании снимков. Обработка космических снимков, проведённая с использованием стандартных средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3, была направлена на получение данных о площадях и периметрах озёр с целью определения степени извилистости их границ.

Тестовые участки (ТУ) выбирались нами, как принято в подобных исследованиях, в местах скопления термокарстовых озёр, т.е. в зонах, где существуют условия для формирования очагов термокарстовых процессов (Викторов, 2006), называемых в работе (Полищук, Богданов, 2015) для краткости зонами активного термокарста (ЗАТ). Схема размещения ТУ на исследуемой территории Большеземельской тундры представлена на *рис. 2*. Выбранные ТУ имели одинаковые размеры, площадь каждого участка составляла около 3110 га. Суммарная площадь всех ТУ составила 62 220 га, что соответствует 0,42 % от площади всей исследованной территории Большеземельской тундры.

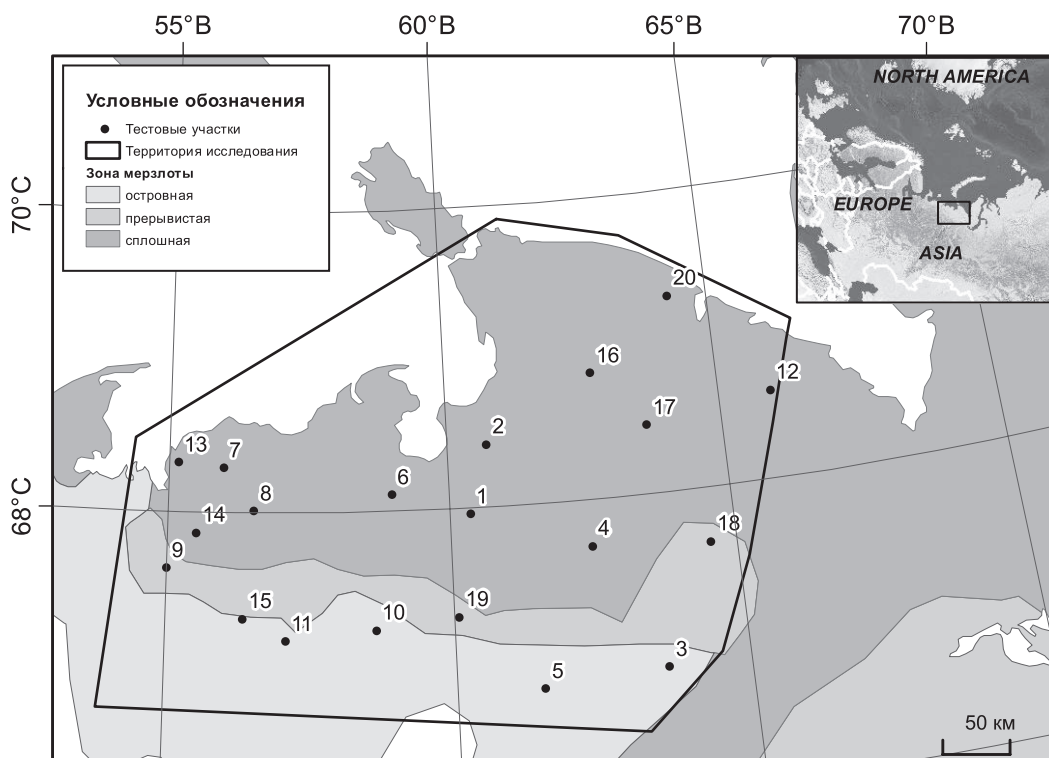


Рис. 2. Схема расположения тестовых участков

В нашей работе для оценки степени извилистости границ термокарстовых озёр был использован показатель формы, рассчитываемый по следующей формуле (Берлянт и др., 2003):

$$z = \frac{p^2}{4\pi S}, \quad (1)$$

где p — периметр; S — площадь озера.

Исследование изменений показателя z было проведено на 20 тестовых участках, расположенных в трёх разных зонах мерзлоты, на каждом из которых определяется от сотен до нескольких тысяч термокарстовых озёр. Для каждого озера были рассчитаны в соответствии с формулой (1) значения z , на основе которых в дальнейшем определялись средние значения (z_{cp}) для каждого ТУ. Полученные данные были использованы далее для анализа зависимости степени извилистости от размеров и местоположения озёр.

Результаты

Анализ полученных данных показал, что величина z на разных тестовых участках изменяется в интервале от 1 до 10–12 (значение «1» соответствует окружности). Средние величины $z_{\text{ср}}$ в разных зонах мерзлоты принимают следующие значения: в островной зоне — 3,5; в прерывистой — 3,38 и в сплошной — 2,95. Приведённые данные показывают незначительный тренд сокращения степени извилистости в среднем при увеличении географической широты, что соответствует данным, полученным для Западной Сибири (Полищук и др., 2019).

На *рис. 3* представлены графики зависимости средних значений степени извилистости границ озёр от их размеров, полученных для каждого ТУ. Заметим, что в связи с необходимостью графического представления зависимости степени извилистости от площадей озёр в очень широком диапазоне их размеров по оси абсцисс на *рис. 3* использована логарифмическая шкала для интервалов площадей озёр. График показывает, что зависимость степени извилистости границ озёр от их площади проявляет заметный линейный тренд с положительным коэффициентом. Следовательно, степень извилистости береговых линий термокарстовых озёр Большеземельской тундры увеличивается в среднем почти в два раза с ростом площади озёр в интервале их размеров от 0,005 до 50 га, что соответствует, согласно (Полищук и др., 2019), данным, полученным для Западной Сибири.

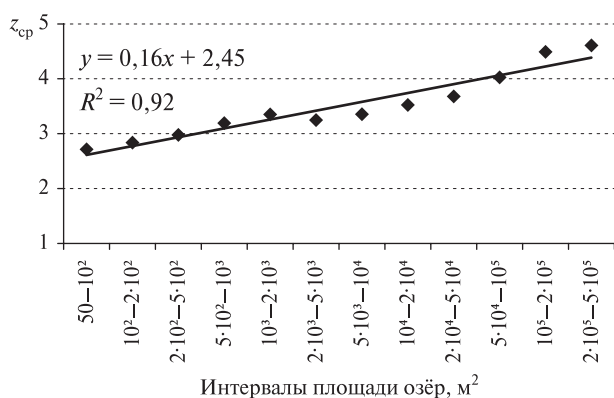


Рис. 3. Зависимость средней степени извилистости границ озёр от их площади



Рис. 4. Гистограмма распределения степени извилистости границ озёр

Для задач моделирования полей термокарстовых озёр и прогноза эмиссии озёрного метана большое значение имеют данные о распределении степени извилистости береговых границ озёр. На *рис. 4* приведена эмпирическая гистограмма распределения степени извилистости границ озёр на основе данных о величине z , рассчитанных в соответствии с формулой (1) по результатам дистанционных измерений на 20 тестовых участках на исследуемой территории Большеземельской тундры. Гистограмма иллюстрирует сокращение числа озёр с увеличением степени извилистости береговых границ. Следовательно, наибольшее число озёр Большеземельской тундры имеет степень извилистости границ, близкую по величине к единице, что соответствует окружности.

Заключение

Рассмотрены методические вопросы исследования параметров термокарстовых озёр в Арктической зоне Большеземельской тундры в достаточно широком диапазоне их размеров на основе космических снимков высокого пространственного разрешения. Для проведения исследований в работе использованы спутниковые снимки высокого разрешения спутника «Канопус-В». Исследования проведены на 20 тестовых участках, размещённых достаточно равномерно на рассматриваемой территории и расположенных во всех зонах многолетней

мерзлоты Большеземельской тундры. Обработка снимков проведена в автоматическом режиме с использованием средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3. В процессе обработки определялись периметры и площади термокарстовых озёр. В качестве степени извилистости использован принятый в картоведении показатель формы двумерных пространственных объектов. Приведена формула для расчёта степени извилистости по результатам дистанционного измерения периметров и площадей озёр.

Полученные экспериментальные данные позволили изучить зависимость извилистости от размеров озёр. Показано, что в среднем извилистость озёрных границ Большеземельской тундры проявляет положительный линейный тренд в зависимости от размеров озёр и увеличивается, как и в Западной Сибири, почти в два раза с ростом площади озёр от 50 м² до 50 га. Была построена гистограмма распределения степени извилистости границ озёр (Кремер, 2004), представляющая озёра на территории криолитозоны Большеземельской тундры. Гистограмма показывает заметное сокращение числа озёр с ростом степени извилистости береговых границ, т. е. большинство озёр имеет степень извилистости, близкую к единице, соответствующей форме озёр в виде окружности. Следует заметить, что эта же закономерность проявляется и при анализе извилистости озёр Западной Сибири (Полищук и др., 2019).

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований по проектам № 19-07-00282, 18-45-860002 и частично 18-47-700001.

Литература

1. Берлянт А. М., Востокова А. В., Кравцова В. И., Лурье И. К., Салищев К. А. Картоведение. М.: Аспект Пресс, 2003. 478 с.
2. Викторов А. С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
3. Кочергин Г. А., Курпьянов М. А., Полищук Ю. М. Анализ погрешности дистанционного измерения площади пространственных объектов на основе моделирования // Вестн. Югорского гос. ун-та. 2018. № 3. С. 25–34.
4. Кравцова В. И., Быстрова А. Г. Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 2. С. 16–26.
5. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.
6. Полищук Ю. М., Полищук В. Ю. Дистанционные исследования изменчивости формы береговых границ термокарстовых озер на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 1. С. 61–64.
7. Полищук В. Ю., Полищук Ю. М. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты. Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. 129 с.
8. Полищук Ю. М., Богданов А. Н. Зоны активного термокарста на территории многолетней мерзлоты и их выявление по космическим снимкам // Изв. Томского политехн. ун-та. 2015. Т. 326. № 12. С. 104–114.
9. Полищук Ю. М., Полищук В. Ю. Использование геоимитационного моделирования для прогноза изменения размеров термокарстовых озер на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 2. С. 32–40.
10. Полищук Ю. М., Муратов И. Н., Полищук В. Ю. Исследование извилистости береговых границ термокарстовых озер Западной Сибири по снимкам высокого разрешения «Канопус-В» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 5. С. 130–137.
11. Holgerson M. A., Raymond P. A. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds // Nature Geoscience Letters. 2016. V. 9. P. 222–226.
12. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting // Intern. J. Environmental Studies. 2009. V. 66. No. 4. P. 423–431.
13. 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.
14. Polishchuk V. Y., Polishchuk Y. M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6 // Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems / ed. O. Pokrovsky. N. Y.: Nova Science Publishers, 2014. P. 205–234.

15. Polishchuk Y. M., Bogdanov A. N., Muratov I. N., Polishchuk V. Y., Lim A., Manasyrov R. M., Shirokova L. S., Pokrovsky O. S. Minor contribution of small thaw ponds to the pools of carbon and methane in the inland waters of the permafrost — affected part of the Western Siberian lowland // *Environmental Research Letters*. 2018. V. 13. P. 1–16.
16. Polishchuk Y. M., Kupriyanov M. A., Muratov I. N., Polishchuk V. Y. Modeling spatial structure of thermokarst lake fields in Siberian Arctic by satellite imagery based on geo-simulation and heuristic approaches // *Atlantis Press: Advances in Intelligent Systems Research*. 2019. V. 166. P. 262–266.
17. Riordan B., Verbyla D., McGuire A. D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // *J. Geophysical Research*. 2006. V. 111. G04002.
18. Zuidhoff F. S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalen, Northern Sweden, especially 1960–1997 // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2000. V. 11. P. 55–69.

Study of tortuosity of the coastal boundaries of thermokarst lakes of Bolshezemelskaya tundra using images of Kanopus-V

Yu. M. Polishchuk, I. N. Muratov, O. A. Baysalamova

Ugra Research Institute of Information Technology, Khanty-Mansiysk 628011, Russia
E-mail: yupolishchuk@gmail.com

The paper is devoted to the issues of using high resolution images to study the properties and distribution of the tortuosity of coastal boundaries of thermokarst lakes in the permafrost zone of Western Siberia. Remote studies were carried out on 78 test sites located fairly evenly in the territory of the cryolithozone of Western Siberia. To describe the tortuosity, an indicator of the shape of spatial objects used in cartography, which is calculated from the results of measuring the area and perimeter of lakes using satellite images, was used. It was found that the degree of tortuosity of the lake borders showed an average positive linear trend with an increase in the area of lakes. A histogram of the distribution of the degree of tortuosity of the coastal boundaries of lakes in a wide range of sizes from 50 m² to 50 ha was constructed.

Keywords: remote sensing, space images, geoinformation systems, permafrost, Bolshezemelskaya tundra, thermokarst lakes, tortuosity of lakes coastal boundaries

Accepted: 23.04.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-95-101

References

1. Berlyant A. M., Vostokova A. V., Kravtsova V. I., Lur'e I. K., Salishchev K. A., *Kartovedenie* (Map studies), Moscow: Aspekt Press, 2003, 478 p.
2. Viktorov A. S., *Osnovnye problemy matematicheskoi morfologii landshafta* (The main problems of mathematical morphology of the landscape), Moscow: Nauka, 2006, 252 p.
3. Kochergin G. A., Kupriyanov M. A., Polishchuk Yu. M., Analiz pogreshnosti distantsionnogo izmereniya ploshchadi prostranstvennykh ob'ektov na osnove modelirovaniya (Accuracy analysis of the remote measurement of the area of spatial objects based on modeling), *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No. 3, pp. 25–34.
4. Kravtsova V. I., Bystrova A. G., Izmenenie razmerov termokarstovykh ozer v razlichnykh raionakh Rossii za poslednie 30 let (Size variation of thermokarst lakes in various regions of Russia over the past 30 years), *Kriosfera Zemli*, 2009, Vol. 13, No. 2, pp. 16–26.
5. Kremer N. Sh., *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* (The theory of probability and mathematical statistics), Moscow: YuNITI-DANA, 2004, 573 p.
6. Polishchuk Yu. M., Polishchuk V. Yu., Distantsionnye issledovaniya izmenchivosti formy beregovykh granits termokarstovykh ozer na territorii mnogoletnei merzloty Zapadnoi Sibiri (Remote studies of the variability of the shape of the coastal boundaries of thermokarst lakes in the permafrost territory of Western Siberia), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 1, pp. 61–64.

7. Polishchuk V. Yu., Polishchuk Yu. M., *Geoimitatsionnoe modelirovanie polei termokarstovykh ozer v zonakh merzloty* (Geo-simulation modeling of thermokarst lakes fields in permafrost zones), Khanty-Mansiysk: UIP YuGU, 2013, 129 p.
8. Polishchuk Yu. M., Bogdanov A. N., Zony aktivnogo termokarsta na territorii mnogoletnei merzloty i ikh vyyavlenie po kosmicheskim snimkam (Zones of active thermokarst on the permafrost territory and their identification by satellite images), *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, Vol. 326, No. 12, pp. 104–114.
9. Polishchuk Yu. M., Polishchuk V. Yu., Ispol'zovanie geoimitatsionnogo modelirovaniya dlya prognoza izmeneniya razmerov termokarstovykh ozer na severe Zapadnoi Sibiri (Use of geo-imitation modeling to predict changes in the size of thermokarst lakes in northern Western Siberia), *Kriosfera Zemli*, 2016, Vol. 20, No. 2, pp. 32–40.
10. Polishchuk Yu. M., Muratov I. N., Polishchuk V. Yu., Issledovanie izvilistosti beregovykh granits termokarstovykh ozer Zapadnoi Sibiri po snimkam vysokogo razresheniya “Kanopus-V” (Study of the tortuosity of the lakes coastal boundaries of thermokarst lakes of Western Siberia using high-resolution images of Canopus-V), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 130–137.
11. Holgerson M. A., Rymond P. A., Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds, *Nature Geoscience Letters*, 2016, Vol. 9, pp. 222–226.
12. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N., Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting, *Intern. J. Environmental Studies*, 2009, Vol. 66, No. 4, pp. 423–431.
13. 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.
14. Polishchuk V. Y., Polishchuk Y. M., Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost, Ch. 6, In: *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems*, O. Pokrovsky (ed.), New York: Nova Science Publishers, 2014, pp. 205–234.
15. Polishchuk Y. M., Bogdanov A. N., Muratov I. N., Polishchuk V. Y., Lim A., Manasyrov R. M., Shirokova L. S., Pokrovsky O. S., Minor contribution of small thaw ponds to the pools of carbon and methane in the inland waters of the permafrost — affected part of the Western Siberian lowland, *Environmental Research Letters*, 2018, Vol. 13, pp. 1–16.
16. Polishchuk Y., Kupriyanov M., Muratov I., Polishchuk V., Modeling spatial structure of thermokarst lake fields in Siberian Arctic by satellite imagery based on geo-simulation and heuristic approaches, *Atlantis Press: Advances in Intelligent Systems Research*, 2019, Vol. 166, pp. 262–266.
17. Riordan B., Verbyla D., McGuire A. D., Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images, *J. Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, G04002.
18. Zuidhoff F. S., Kolstrup E., Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalen, Northern Sweden, especially 1960–1997, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, Vol. 11, pp. 55–69.