

Исследование извилистости береговых границ термокарстовых озёр Западной Сибири по снимкам высокого разрешения «Канопус-В»

Ю. М. Полищук¹, И. Н. Муратов¹, В. Ю. Полищук^{2,3}

¹ Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий
Ханты-Мансийск, 628011, Россия
E-mail: yupolishchuk@gmail.com

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
Томск, 634021, Россия

³ Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия
E-mail: liquid_metal@mail.ru

Статья посвящена вопросам использования снимков высокого разрешения для исследования свойств и распределения извилистости береговых границ термокарстовых озёр в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири. Дистанционные исследования проведены на 78 тестовых участках, расположенных достаточно равномерно на территории криолитозоны Западной Сибири. 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 широком диапазоне их размеров от 50 м² до 20 тыс. га. Статистический анализ показал, что эмпирическое распределение озёр по площадям, согласно критерию Пирсона, соответствует логнормальному закону распределения. Определены параметры логнормального закона распределения площадей озёр по эмпирическим данным.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, геоинформационные системы, космические снимки, извилистость береговых линий озёр, логнормальный закон распределения

Одобрена к печати: 10.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-130-137

Введение

Озёра и другие поверхностные водоёмы как важные источники эмиссии парниковых газов в атмосферу в зонах мерзлоты являются объектами дистанционных исследований ввиду труднодоступности и высокой степени заболоченности северных территорий. Потепление климата последних десятилетий привело к значительному ускорению термокарстовых процессов в зоне многолетней мерзлоты, вызывающему рост концентрации метана в термокарстовых озёрах. Проведённые в последнее время многочисленные дистанционные исследования динамики численности и размеров термокарстовых озёр в Северной Евразии и Северной Америке (Kirpotin et al., 2009; Luoto, Seppala, 2003; Riordan et al., 2006; Zuidhoff, Kolstrup, 2000) позволили создать геоимитационную модель динамики полей термокарстовых озёр (Polishchuk, Polishchuk, 2014), пригодную для формирования прогнозных оценок динамики накопления озёрного метана.

Пространственная структура этой модели определяется совокупностью окружностей со случайными размерами и случайным расположением (Polishchuk, Polishchuk, 2014). Дистанционные исследования пространственной изменчивости формы контуров (извилистости береговых линий) реальных озёр, проведённые в различных зонах мерзлоты (сплошная, прерывистая и островная) Западной Сибири, показали (Полищук, Полищук, 2013), что форма контуров реальных озёр в большинстве случаев отличается от окружности. Для иллюстрации на *рис. 1* (см. с. 131) представлен фрагмент дешифрованного космического

снимка Landsat-5 территории одного из тестовых участков, заимствованный из нашей работы (Полищук, Полищук, 2013), который показывает, что контуры границ реальных термокарстовых озёр принимают разнообразные формы. Следовательно, поля термокарстовых озёр можно рассматривать как совокупности случайных плоских фигур с существенно различающимися размерами (площадями) и с разной степенью извилистости границ.

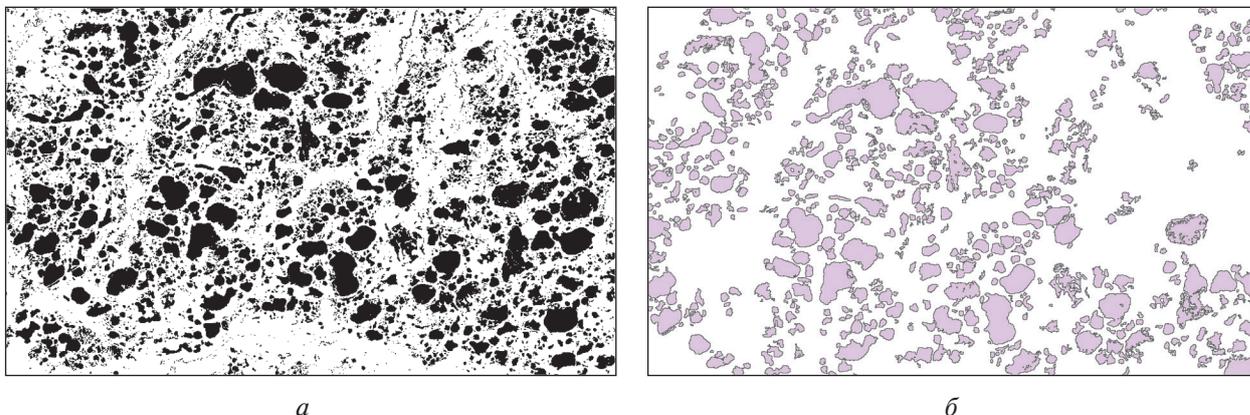


Рис. 1. Контуры термокарстовых озёр (б), дешифрованные по космическому снимку (а) Landsat-5 (13.07.2007)

Экспериментальные исследования возможности аппроксимации контуров береговых границ озёр окружностями были проведены на трёх тестовых участках (ТУ), выбранных в разных зонах мерзлоты на территории Западной Сибири (Полищук, Полищук, 2012). Результаты статистического анализа данных этих исследований подтверждают возможность замены контуров реальных озёр окружностями с погрешностью около 5 %. В этих исследованиях использовались космические снимки среднего разрешения Landsat (30 м), на которых не обнаруживаются озёра малых размеров. Полученные по ним данные о степени извилистости береговых границ относятся к озёрам с размерами более 1–10 га. Поэтому представляет интерес изучить извилистость береговых границ озёр с размерами от десятков квадратных метров до десятков гектар, для чего следует использовать снимки высокого разрешения.

Известно, что масса накопленного в озёрах метана, а следовательно, и его эмиссия в атмосферу определяется площадью водного зеркала озера. Так как извилистость береговых линий может оказывать влияние на погрешность дистанционного измерения площади озёр, то и погрешность расчётных объёмов эмиссии метана будет зависеть от степени извилистости. Однако эта зависимость в настоящее время не изучена, что и определяет важность и актуальность дистанционных исследований извилистости границ озёр. В связи с этим целью работы стало изучение закономерностей изменения степени извилистости в зависимости от размеров озёр и географической широты их местоположения, а также определение закона распределения степени извилистости с использованием снимков высокого разрешения.

Данные и методы исследования

Согласно работе (Викторов, 2006), образование термокарстовых озёр происходит под воздействием нескольких факторов, главными из которых являются наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород и равнинный характер территории. В исследовании (Кравцова, Быстрова, 2009) на основе геоморфологического и климатического анализа вся криолитозона Западной Сибири отнесена к числу районов с повсеместным распространением термокарстовых озёр. Поэтому озёра, извилистость границ которых исследуется в настоящей работе дистанционным методом, рассматриваются как термокарстовые. Такие озёра характеризуются

чрезвычайно широким интервалом изменений их размеров: от единиц квадратных метров до сотен тысяч гектаров.

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 Западной Сибири с использованием космических снимков высокого разрешения российского спутника дистанционного зондирования Земли «Канопус-В» (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 выделению озёр при дешифрировании изображений. 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 закона распределения степени извилистости их границ и изучения закономерностей изменения извилистости в зависимости от размеров озёр и географической широты их местоположения.

Тестовые участки 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). Поэтому для выбора тестовых участков применялась карта расположения зон активного термокарста на территории криолитозоны Западной Сибири, построенная по снимкам Landsat-8 с использованием ArcGIS 10.3 в соответствии с методикой формирования картографического слоя границ ЗАТ (Полищук, Богданов, 2015).

Схема размещения ТУ на исследуемой территории Западной Сибири и их краткая характеристика даны в работе (Polishchuk et al., 2018). Отметим здесь, что выбранные тестовые участки имели приблизительно одинаковые размеры (таблица). Суммарная площадь всех ТУ составляла около 0,2 млн га, что соответствует 0,002 % от всей площади исследованной территории криолитозоны Западной Сибири.

Характеристика тестовых участков для исследований
на основе космических снимков высокого разрешения

Зона мерзлоты	Количество ТУ	Номера ТУ	Средняя площадь ТУ, га
Островная	29	1–29	2845
Прерывистая	18	30–47	3125
Сплошная	31	47–78	3109

В нашем исследовании для оценки степени извилистости границ термокарстовых озёр был использован показатель формы z , введённый в работе (Берлянт и др., 2003) в следующем виде:

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

где p — периметр; S — площадь озера.

Исследование изменений показателя z было проведено на 78 тестовых участках, расположенных в трёх разных зонах мерзлоты, на каждом из которых определяется несколько сотен или тысяч термокарстовых озёр. Для каждого озера были рассчитаны в соответствии с формулой (1) значения z , использованные в дальнейшем для определения закона распределения степени извилистости. Кроме этого, на основе рассчитанных значений степени извилистости были определены средние значения для каждого ТУ (z_{cp}), использованные далее для анализа зависимости степени извилистости от географической широты и от размеров озёр.

Результаты

На *рис. 2* представлены графики зависимости средних значений степени извилистости границ озёр, полученных для каждого ТУ, от размеров озёр и географической широты местоположения тестовых участков. Заметим, что в связи с необходимостью графического представления степени извилистости в зависимости от размеров озёр в очень широком их диапазоне, по оси абсцисс на *рис. 2б* использована логарифмическая шкала для интервалов площадей озёр, возможность чего была обоснована в работе (Полищук и др., 2016).

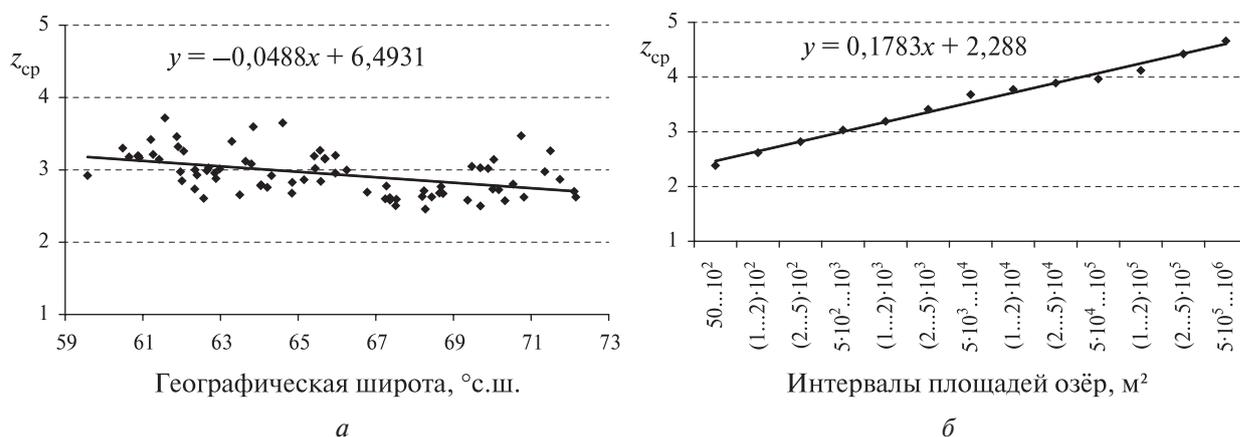


Рис. 2. Зависимость средней степени извилистости границ озёр от географической широты (*а*) и от их площади (*б*)

Как видно на *рис. 2а*, средние значения степени извилистости изменяются в пределах от 2,4 до 3,7 (со средней величиной 2,95). Дадим интерпретацию полученных результатов. Согласно (Берлянт и др., 2003), для окружности $z = 1$ полученное в результате наших исследований усреднённое по всей исследуемой территории значение степени извилистости (2,95) показывает, что реальные термокарстовые озёра в зоне мерзлоты характеризуются заметной извилистостью береговых границ. На *рис. 2а* также видно, что с ростом широты степень извилистости в среднем уменьшается, хотя эта зависимость достаточно слабая. Поэтому можно принять, что степень извилистости береговых границ озёр в среднем приблизительно одинакова в различных зонах мерзлоты, что может быть интерпретировано как относительная схожесть формы береговых границ термокарстовых озёр в разных зонах мерзлоты.

Рисунок 2б показывает, что зависимость степени извилистости границ озёр от их площади проявляет заметный линейный тренд с положительным коэффициентом тренда. Следовательно, степень извилистости береговых линий термокарстовых озёр Западной Сибири увеличивается почти в два раза с ростом площади озёр в интервале их размеров от 0,005 до 100 га.

Для задач моделирования полей термокарстовых озёр и прогноза эмиссии озёрного метана важное значение имеет знание законов распределения степени извилистости береговых границ озёр. В настоящее время этот вопрос не исследован, и в литературе не имеется публикаций на эту тему. На *рис. 3* 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 78 ТУ на исследуемой территории Западной Сибири.

По виду графика гистограммы на *рис. 3* (см. с. 134) можно предполагать, что распределение степени извилистости будет соответствовать теоретическому логнормальному закону. Для обоснования возможности использования логнормального закона распределения степени извилистости границ озёр проведена проверка соответствия данного закона эмпирической гистограмме. Результаты проверки этого соответствия (по критерию χ^2) приводятся ниже.



Рис. 3. Гистограмма распределения степени извилистости границ озёр по снимкам спутника «Канопус-В» в зоне мерзлоты Западной Сибири

Согласно работе (Кремер, 2004), плотность вероятности для логнормального закона распределения степени извилистости (z) определяется уравнением:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot z\sigma} \exp\left(-\frac{(\ln z - \ln a)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где a и σ — параметры логнормального закона распределения.

Оценка параметров логнормального закона распределения извилистости озёрных границ Западной Сибири может быть произведена на основе выборочных данных. Используя полученные данные о степени извилистости в широком диапазоне размеров озёр, определим параметры логнормального распределения площадей озёр криолитозоны Западной Сибири в следующем виде: $a = 2,65$ и $\sigma = 0,67$. Соответствие экспериментально полученного по снимкам высокого пространственного разрешения распределения озёр теоретическому логнормальному закону было определено с помощью стандартной процедуры проверки статистических гипотез о виде закона распределения (Кремер, 2004). Выполненная с помощью программного пакета Excel проверка соответствия эмпирического и теоретического распределений с использованием критерия Пирсона показала, что эмпирическая гистограмма распределения извилистости контуров озёр криолитозоны Западной Сибири, полученная в широком диапазоне их размеров с учётом малых озёр, соответствует логнормальному закону с вероятностью 0,99.

Заключение

Рассмотрены методические вопросы исследования степени извилистости береговых линий термокарстовых озёр в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири в достаточно широком диапазоне размеров озёр на основе космических снимков высокого пространственного разрешения. В работе использованы спутниковые снимки высокого разрешения спутника «Канопус-В». Исследования проведены на 78 тестовых участках, расположенных достаточно равномерно во всех зонах многолетней мерзлоты Западной Сибири. Обработка изображений выполнена в автоматическом режиме с использованием средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3. Приведена расчётная формула для степени извилистости по результатам дистанционного измерения периметров и площадей озёр.

Полученные экспериментальные данные позволили изучить зависимость извилистости от географической широты и размеров озёр. Установлена достаточно слабая широтная зависимость степени извилистости, что позволяет пренебрегать ею и не учитывать в задачах

моделирования полей озёр в зоне мерзлоты. Показано, что в среднем извилистость озёрных границ проявляет положительный линейный тренд с ростом площади озёр.

Также на основе космических снимков высокого пространственного разрешения рассмотрены вопросы исследования распределения извилистости контуров озёр в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири. В процессе обработки определялись периметры и площади термокарстовых озёр. Была построена гистограмма распределения извилистости границ озёр, представляющая озёра с площадями от 50 м² до 20 000 га на территории криолитозоны Западной Сибири.

Показано, что полученная эмпирическим путём гистограмма распределения соответствует теоретическому логнормальному закону. Проведена проверка соответствия этого закона эмпирической гистограмме. Результаты показали, что логнормальный закон соответствует экспериментальным данным, согласно критерию Пирсона, на уровне значимости 0,99. Это позволяет использовать логнормальный закон распределения озёр по площадям для моделирования полей термокарстовых озёр в зоне мерзлоты Западной Сибири и в других задачах.

Заметим, что учёт влияния географических и климатических факторов на полученные по спутниковым снимкам данные не проводился. Поэтому авторы исходят из допущения о том, что полученные данные и определённые по ним значения параметров логнормального закона являются показательными для данного региона.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 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. Кравцова В. И., Быстрова А. Г. Изменение размеров термокарстовых озёр в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 2. С. 16–26.
4. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.
5. Полищук Ю. М., Полищук В. Ю. Дистанционные исследования изменчивости формы береговых границ термокарстовых озёр на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири // Исследование Земли из космоса. 2012. № 1. С. 61–64.
6. Полищук В. Ю., Полищук Ю. М. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озёр в зонах мерзлоты. Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. 129 с.
7. 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.
8. Полищук Ю. М., Богданов А. Н., Муратов И. Н. Методические вопросы построения обобщенных гистограмм распределения площадей озёр в зоне мерзлоты на основе космических снимков среднего и высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 224–232.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.

13. 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. Iss. G4. Article id G04002. 11 p.
14. 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 the tortuosity of the coastal boundaries of thermokarst lakes of Western Siberia using high-resolution images of Kanopus-V

Yu. M. Polishchuk¹, I. N. Muratov¹, V. Yu. Polishchuk^{2,3}

¹ *Ugra Research Institute of Information Technology, Khanty-Mansiysk 628011, Russia*
E-mail: yupolishchuk@gmail.com

² *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS*
Tomsk 634021, Russia

³ *Tomsk Polytechnic University, Tomsk 634050, Russia*
E-mail: liquid_metal@mail.ru

The paper is devoted to the issues of using high resolution images to study the properties and distribution of the tortuosity of the coastal boundaries of thermokarst lakes in the permafrost zone of Western Siberia. Remote studies were carried out on 78 test sites distributed fairly evenly over the territory of the cryolithozone of Western Siberia. To describe the tortuosity, an indicator of the shape of spatial objects adopted in cartography, which is calculated from the results of measuring the area and perimeter of lakes using satellite images, is used. The degree of tortuosity of the lake borders showed an average positive linear trend with an increase in the area of the lakes. A histogram of the distribution of the degree of tortuosity of the coastal boundaries of the lakes in a wide range of sizes from 50 m² to 20 thousand hectares was constructed. Statistical analysis showed that the empirical distribution, according to the Pearson criterion, corresponded to the lognormal distribution law. The parameters of the lognormal law of the distribution of lake tortuosity according to empirical data were determined.

Keywords: permafrost, geoinformation systems, space images, degree of tortuosity of the lakes boundaries, lognormal distribution law

Accepted: 10.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-130-137

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. 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.
4. Kremer N. Sh., *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* (The theory of probability and mathematical statistics), Moscow: YuNITI-DANA, 2004, 573 p.
5. 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.
6. 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-Mansiisk: UIP YuGU, 2013, 129 p.

7. 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.
8. Polishchuk Yu. M., Bogdanov A. N., Muratov I. N., Metodicheskie voprosy postroeniya obobshchennykh gistogramm raspredeleniya ploshchadei ozer v zone merzloty na osnove kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo razresheniya (Methodological issues of constructing generalized histograms of the distribution of lake areas in the permafrost zone based on medium and high resolution satellite images), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 224–232.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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, Issue G4, Article id G04002, 11 p.
14. 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.