

Исследование извилистости береговых линий термокарстовых озёр в восточной части российской Арктики по снимкам высокого разрешения спутника «Канопус-В»

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

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

Статья посвящена вопросам дистанционных исследований свойств извилистости береговых линий термокарстовых озёр на четырёх арктических территориях, представляющих сравнительно однородные по свойствам области, называемые далее экорегионами. Исследование извилистости берегов направлено на решение актуальной проблемы снижения погрешностей при измерении площади термокарстовых озёр по данным космической съёмки. Для проведения исследований выбран 31 тестовый участок приблизительно равной площади в разных экорегионах, расположенных в Якутии, на Чукотке и Камчатке. На каждом тестовом участке по снимкам спутника «Канопус-В» определялось от сотен до нескольких тысяч озёр с минимальной площадью 40 м². На основе измерения площадей и периметров озёр в каждом экорегионе построены гистограммы распределения степени извилистости береговых линий озёр, проявляющие сходный характер на различных территориях. Показано, что степень извилистости озёрных береговых линий изменяется в достаточно широком интервале значений от единицы до нескольких десятков, хотя диапазон изменения их средних значений на разных территориях сравнительно невелик и составляет от трёх до пяти. Изучена зависимость степени извилистости от размеров озёр. Установлено, что эта величина в среднем проявляет положительный тренд с ростом площади озёр от 50 до 10 000 м², а при больших размерах озёр она колеблется в незначительных пределах. Полученные результаты могут быть приняты во внимание при оценке погрешностей измерения площадей озёр на исследованных территориях по снимкам спутника «Канопус-В».

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, геоинформационные системы, космические снимки, арктическая тундра, термокарстовые озёра, извилистость озёрных береговых линий, гистограммы распределения озёр по степени извилистости, экорегионы

Одобрена к печати: 14.10.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-177-184

Введение

В условиях современных климатических изменений большой интерес представляет проблема оценки и прогноза объёмов эмиссии парниковых газов с территории Арктической зоны как места сосредоточения термокарстовых озёр — интенсивных источников природного метана. Известно, что объёмы эмиссии в атмосферу озёрного метана и углекислого газа определяются суммарной площадью озёр. Поэтому для получения прогнозных оценок динамики накопления озёрного метана могут применяться методы и средства моделирования динамики полей термокарстовых озёр с использованием спутниковых данных о площадях озёр.

Проведённые в последнее время многочисленные дистанционные исследования термокарстовых озёр в Северной Евразии и Северной Америке позволили создать геоимитационную модель полей термокарстовых озёр (Полищук, Полищук, 2016; Polishchuk, Polishchuk, 2014), обеспечивающую формирование прогнозных оценок динамики площадей озёр с практически приемлемой погрешностью. Пространственная структура этой модели определяется совокупностью окружностей со случайными размерами и случайным расположением. Однако, как показали дистанционные исследования геометрических свойств термокарстовых озёр в зоне мерзлоты (Муратов и др., 2020; Полищук и др., 2019, 2020), практически все реальные озёра имеют извилистую форму береговых границ, отличающуюся от окружности, что может оказывать влияние на погрешности дистанционного измерения площадей озёр.

Вопросы оценки погрешностей дистанционного измерения площади пространственных объектов рассматривались в работах (Корниенко, 2014; Crapper, 1980), в которых исследована погрешность определения площади озёр по космическим снимкам в зависимости от соотношения площади озера и пространственного разрешения снимка. В общем случае рассматриваемая погрешность зависит не только от соотношения площади объекта и пространственного разрешения снимка, но и от формы контура объекта, т. е. от степени извилистости береговых границ озёр. Исследования влияния извилистости озёрных границ на точность измерения площади озёр по космическим снимкам, проведённые в работе (Kurpianov et al., 2020), показали существенное влияние этого показателя на рассматриваемые погрешности.

Экспериментально извилистость береговых границ реальных термокарстовых озёр в настоящее время изучена недостаточно. Дистанционные исследования свойств извилистости береговых границ реальных озёр, выполненные на отдельных территориях европейской части российской Арктики (Муратов и др., 2020; Полищук и др., 2020) и в Западной Сибири (Полищук и др., 2019), занимающих суммарно менее четверти арктической зоны России, не могут рассматриваться как представительные для всей российской Арктики без проведения аналогичных исследований на обширных восточных арктических территориях с выраженной неоднородностью ландшафтов и неровным рельефом.

В связи с этим цель настоящей работы заключается в экспериментальном исследовании свойств извилистости береговых границ озёр на территориях восточных арктических экорегионов России — в Северо-Восточных тундровой и таёжной зонах (Якутия) и в Чукотской и Беринговой тундрах — по спутниковым снимкам высокого разрешения.

Методические вопросы

Исследуемая территория площадью 2 182 000 км² простирается примерно на 2500 км с запада на восток и 1200 км с севера на юг. Согласно публикации (Котляков и др., 2020), территория располагается в зонах арктического и субарктического климатических поясов. Средняя температура в январе изменяется от -27°C (Чукотская тундра) до -44°C (Северо-Восточная тайга). Средняя температура июля изменяется от 4 до 15°C . На территории исследования широко распространены многолетнемёрзлые породы, достигающие на северо-востоке Якутии наибольшей (до 500 м) мощности при постоянной температуре -10°C и сравнительно тонком (от 30 до 100 см) слое сезонного протаивания. Территория подстилается непрерывной вечной мерзлотой, среднегодовая температура грунтов которой, по данным работы (Котляков и др., 2020), изменяется в пределах от -3 до -7°C . Годовая сумма осадков колеблется от 150 до 600 мм.

Исследуемая территория, картосхема расположения которой приведена на *рис. 1* (см. с. 179), была разделена на четыре сравнительно однородных по ландшафтным и геокриологическим свойствам области, называемые далее в соответствии с терминологией (Olson et al., 2001) арктическими экорегионами: Северо-Восточная тундра (СВТ), Северо-Восточная тайга (СТ), Чукотская тундра (ЧТ) и Берингова тундра (БТ).

Экспериментальное изучение свойств извилистости береговых границ термокарстовых озёр проведено по данным дистанционного измерения площадей и периметров озёр по спутниковым снимкам. Исследования проводились с использованием спутниковых снимков высокого разрешения (2,1 м) «Канопус-В». Все снимки были отобраны в довольно короткий период летнего сезона (конец июня — август), чтобы минимизировать влияние сезонных колебаний уровня воды в озёрах. В этот период практически полностью исчезает ледяной покров на озёрах, мешающий выделять озёра при дешифрировании снимков. Обработка снимков проведена в автоматическом режиме с использованием средств геоинформационной системы QGIS 3.

Размеры тестовых участков (ТУ) составляли от 2900 до 3770 га. На каждом тестовом участке определялось по снимкам от 109 до 4791 озёр. Минимальные размеры озёр составляли 40 м² (площадью около 10 пикселей для надёжного дешифрирования озёр), а макси-

мальные — несколько сотен гектаров. Для каждого озера по результатам дистанционных измерений площадей и периметров озёр были рассчитаны степени извилистости границ озёр по формуле из книги (Берлянт, 1978):

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

где s и p — соответственно площадь и периметр озера.



Рис. 1. Территория исследований на востоке российской Арктики с обозначенными границами арктических экорегионов: СВТ — Северо-Восточная тундра; СТ — Северо-Восточная тайга; ЧТ — Чукотская тундра; БТ — Берингова тундра

Рассчитанные в соответствии с выражением (1) значения степени извилистости z использовались в дальнейшем для анализа закономерностей изменения свойств извилистости на разных арктических территориях. В частности, на основе рассчитанных значений степени извилистости были определены средние значения ($z_{\text{ср}}$) как среднеарифметическое из величин z для каждого из тестовых участков. Эти средние значения использовались далее для анализа зависимости степени извилистости от размеров озёр.

Результаты

Анализ данных о величине z , полученных в соответствии с выражением (1) по снимкам «Канопус-В» на 31 ТУ на территории четырёх исследованных арктических экорегионов, показывает, что величина z на разных ТУ изменяется в широком интервале от единицы до нескольких десятков. Отметим, что значение $z = 1$ соответствует окружности. Общая характеристика полученных данных о степени извилистости на территориях исследованных экорегионов дана в *таблице*.

Общая характеристика результатов исследования степени извилистости озёрных границ на рассмотренных территориях

Территория исследования	Число ТУ	Общее число озёр	z_{\min}	z_{\max}	z_{cp}
Северо-Восточная тундра	8	1585	1,07	63,23	5,54
Северо-Восточная тайга	10	1361	1,10	54,32	5,06
Чукотская тундра	4	4179	1,08	74,10	3,78
Берингова тундра	9	1928	1,05	62,89	4,04

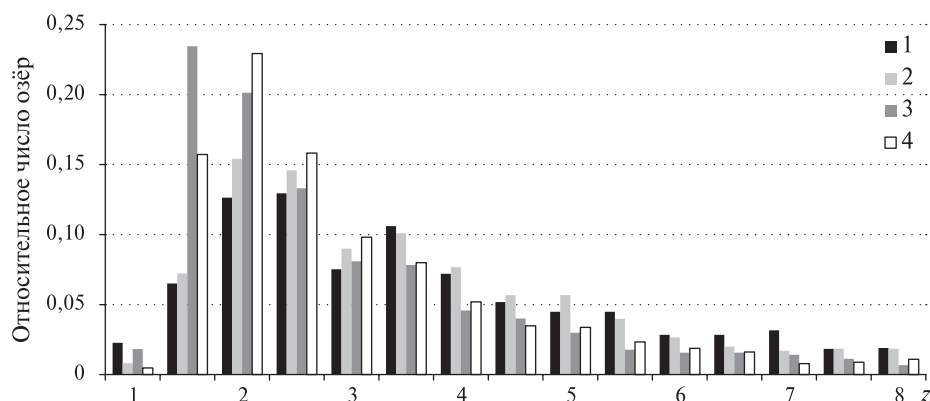


Рис. 2. Гистограммы распределения степени извилистости границ озёр на территориях исследования в четырёх восточных экорегионах России: 1 — СВТ, 2 — СТ, 3 — ЧТ, 4 — БТ

Согласно *таблице*, на территории всех экорегионов z_{\min} изменялось от 1,05 до 1,10, т.е. реальные озёра с минимальной извилистостью имеют форму контура береговых границ, близкую к окружности. Однако озёра с границами в форме окружности вообще не встречаются. Заметим, что при достаточно больших диапазонах разброса значений степени извилистости её средние значения имеют сравнительно небольшие величины и в разных экорегионах изменяются в небольших пределах от 3,78 до 5,54.

На *рис. 2* приведены графики эмпирических гистограмм распределения степени извилистости границ озёр, полученные в результате дистанционных исследований на территории различных арктических экорегионов востока России. Графики гистограмм демонстрируют сходный характер распределения z в разных экорегионах. Так как относительное число озёр с величинами $z > 8$ для всех исследованных территорий крайне мало и их вклад в формирование гистограмм не превышает 1–2 %, данные о таких озёрах при построении графика на *рис. 2* были опущены.

Как видно из графика гистограмм, большинство озёр (более 71 % для всех исследованных экорегионов) имеют степень извилистости, изменяющуюся в достаточно узком диапазоне (1,5–6), а число озёр с большими значениями z (более 6) сравнительно невелико. На *рис. 3* представлен график зависимости средней степени извилистости от размеров озёр. Заметим, что для удобства графического представления этой зависимости в очень широком диапазоне изменения размеров озёр (от десятков квадратных метров до сотен гектаров) по оси абсцисс графика на *рис. 3* (см. с. 181) для интервалов площадей озёр использована логарифмическая шкала.

Рисунок 3 показывает, что зависимость степени извилистости границ озёр от их площади в интервале размеров озёр 50–5000 м² проявляет заметный рост от 3,2 до 7,8, а при дальнейшем увеличении размеров (более 5000 м²) колеблется в интервале значений приблизительно 6–8. Как видно из *рис. 3*, наименьшую степень извилистости (3,2–3,8) имеют малые озёра с размерами 50–200 м², а степень извилистости больших озёр с размерами более 1000 м² составляет около 6–8, т.е. примерно в 2–2,5 раза больше, чем у малых озёр.

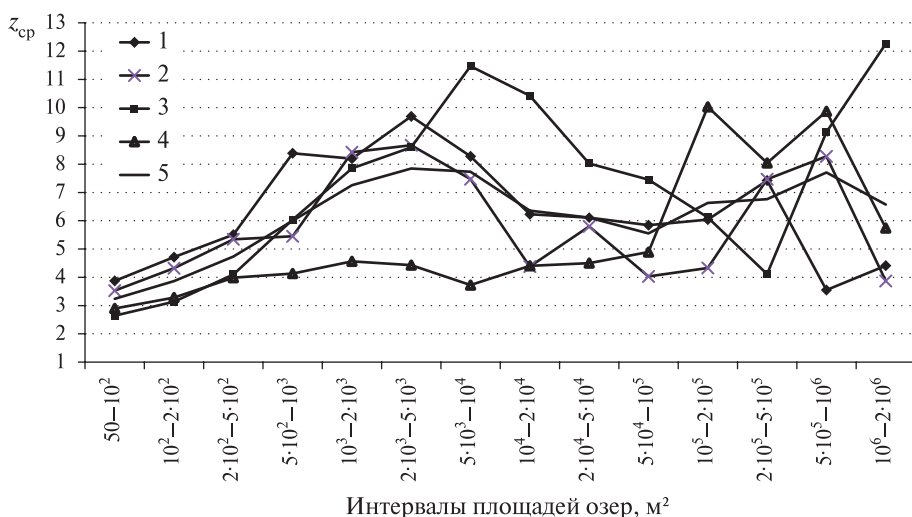


Рис. 3. Зависимость среднего значения степени извилистости границ озёр от их площади на различных территориях исследований: 1 — СВТ, 2 — СТ, 3 — ЧТ, 4 — БТ, 5 — усреднённое значение по всем четырём экорегионам

В порядке обсуждения полученных результатов обратим внимание на тот факт, что в аналогичных исследованиях в других арктических регионах — в Большеземельской тундре (Полищук и др., 2020) и в Западной Сибири (Полищук и др., 2019) — зависимости степени извилистости от площади озёр имеют чётко выраженный положительный тренд. Однако для озёр восточной части российской Арктики, согласно рис. 3, положительный тренд наблюдается лишь для озёр очень малых размеров (приблизительно до 10^3 м²), а при больших размерах такого явного тренда нет. По нашему мнению, различие в динамике степени извилистости на разных территориях может быть обусловлено разным характером рельефа. Для Западно-Сибирской и Большеземельской тундр, расположенных на озёрно-термокарстовых равнинах с невыраженным рельефом, извилистость берегов определяется термокарстовыми процессами, воздействие которых увеличивается с ростом размеров озёр, что и определяет указанный выше положительный тренд. А для экорегионов восточной Арктики России, расположенных на территориях с выраженным рельефом (холмистый, горный), на извилистость озёр, по крайней мере с размерами более 0,1–1 га, большее влияние оказывают не термокарстовые процессы, а особенности рельефа, что и может объяснять «невыраженность тренда» на рис. 3.

Заключение

Рассмотрены вопросы исследования извилистости береговых линий термокарстовых озёр достаточно обширной восточной части арктической зоны России, составляющей более трети площади всей российской Арктики. Настоящая статья может рассматриваться как продолжение аналогичных работ, выполненных авторами ранее для других регионов российской Арктики (Полищук и др., 2019, 2020). Отметим, что данное исследование извилистости берегов, как и предыдущие аналогичные работы авторов, направлено на решение актуальной проблемы снижения погрешностей при измерении площади термокарстовых озёр по снимкам спутника «Канопус-В». Исследования проведены на 31 тестовом участке, которые были выбраны в четырёх исследовательских экорегионах, расположенных в Якутии, на Чукотке и Камчатке, в широком диапазоне размеров озёр (от 40 м²) на основе космических снимков «Канопус-В».

Показано, что степень извилистости изменяется от единицы до нескольких сотен со средним значением, колеблющемся в разных экорегионах приблизительно в интервале 3,5–5,5. Исследована зависимость извилистости от размеров озёр. Показано, что на территории

восточной части российской Арктики наименьшую степень извилистости (3,2–3,8) имеют малые озёра с размерами 50–200 м², а степень извилистости больших озёр с размерами более 1000 м² слабо зависит от их размеров и составляет около 6–8, т. е. примерно в 2–2,5 раза больше, чем у малых озёр. Полученные результаты могут быть приняты во внимание при оценке погрешностей измерения площадей озёр на исследованных территориях по снимкам спутника «Канопус-В».

Работа выполнена в рамках государственного задания Департамента информационных технологий и цифрового развития Ханты-Мансийского автономного округа — Югры на 2021 г. и при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований по проектам № 18-45-860002 и 19-07-00282.

Литература

1. Берлянт А. М. Картографический метод исследования. М.: Изд-во Москов. ун-та, 1978. 257 с.
2. Корниенко С. Г. Оценка погрешности измерения площади водоемов в криолитозоне по данным космической съемки различного пространственного разрешения // Криосфера Земли. 2014. Т. 18. № 4. С. 86–93.
3. Котляков В. М., Хаин В. Е., Гуцуляк В. Н., Данилов А. И. Арктика // Большая рос. энциклопедия. [Электронный ресурс]. 2020. URL: <https://bigenc.ru/geography/text/3452274> (дата обращения: 24.05.2021).
4. Муратов И. Н., Садыков А. О., Полищук Ю. М. Дистанционное исследование термокарстовых озер Малоземельской тундры // 14-й Международ. симп. Москов. научно-техн. о-ва радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова. Сер. «Науч. Международные симп. Проблемы экоинформатики». Вып. 14: сб. докл. / под ред. Ф. А. Мкртчяна. 2020. С. 190–194.
5. 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.
6. 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. Т. 16. № 5. С. 130–137. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-130-137.
7. Полищук Ю. М., Муратов И. Н., Байсалямова О. А. Дистанционные исследования извилистости береговых границ термокарстовых озёр Большеземельской тундры по снимкам «Канопус-В» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 95–101. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-95-101.
8. Crapper P. F. Errors incurred in estimating an area of uniform land cover using Landsat // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1980. V. 46. No. 10. P. 1295–1301.
9. Kupriyanov M., Kochergin G., Muratov I., Polishchuk Yu. Accuracy Analysis of Remote Measurement of Thermokarst Lakes Parameters for Field Dynamics Modeling Problems // Proc. 8th Scientific Conf. Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020). Ser. Advances of Social Science, Education and Humanities Research. Atlantis Press, 2020. V. 174. P. 237–241.
10. Olson D. M., Dinerstein E., Wikramanayake E. D., Burgess N. D., Powell G. V., Underwood E. C., D'amico J. A., Itoua I., Strand H. E., Morrison J. C., Loucks C. J., Allnutt T. F., Ricketts T. H., Kura Y., Lamoreux J. F., Wettengel W. W., Hedao P., Kassem K. R. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth // BioScience. 2001. V. 51. Iss. 11. P. 933–938. DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2.
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. DOI:10.3897/issn2541-8416.2019.19.1.1.

Study of the tortuosity of thermokarst lake coastlines in the eastern Russian Arctic using Kanopus-V high-resolution images

Yu. M. Polishchuk, I. N. Muratov, O. A. Baysalyamova, P. A. Nabiullina

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

The article is devoted to the issues of remote sensing of the tortuosity properties of thermokarst lake coastlines in four Arctic territories, which are relatively homogeneous areas in terms of properties, hereinafter called ecoregions. For the research, 31 test sites of approximately equal area were selected in different ecoregions located in Yakutia, Chukotka and Kamchatka. At each test site, using the Kanopus-V images, from hundreds to several thousand lakes with a minimum area of 40 m² were determined. On the basis of measurements of areas and perimeters of the lakes in each ecoregion, histograms of the lake coastlines tortuosity degree distribution were constructed, showing a similar character in different territories. It is shown that the tortuosity degree of lake coastlines varies in a fairly wide interval of values from one to several tens, although the range of changes in their average values in all ecoregions is relatively small and ranges from 3 to 5. The dependence of the tortuosity degree on the lake size has been studied. It was found that this value, on average, shows a positive trend with an increase in the area of the lakes from 50 to 10,000 m², and for large lakes it fluctuates within small limits. The results obtained can be taken into account when estimating the errors in measuring the lake areas in the investigated territories using the Kanopus-V satellite images.

Keywords: permafrost, space images, arctic tundra, thermokarst lakes, tortuosity of lake coastlines, histograms of the lake coastlines tortuosity degree distribution, ecoregions

Accepted: 14.10.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-177-184

References

1. Berlyant A. M., *Kartograficheskii metod issledovaniya* (Cartographic method of research), Moscow: Izd. Moskovskogo universiteta, 1978, 257 p. (in Russian).
2. Kornienko S. G., Assessment accuracy of measurement of the water body area in the permafrost using different spatial resolution satellite imagery, *Kriosfera Zemli*, 2014, Vol. 18, No. 4, pp. 86–93 (in Russian).
3. Kotlyakov V. M., Khain V. E., Gutsulyak V. N., Danilov A. I., *Arktika (Arctic)*, *Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya* (The Great Russian Encyclopedia. Electronic version) (in Russian), available at: <https://bigenc.ru/geography/text/3452274> (accessed 24.05.2021).
4. Muratov I. N., Sadykov A. O., Polishchuk Yu. M., Remote study of thermokarst lakes of the Malozemel'skaya tundra, *Mezhdunarodnyi simpozium Moskovskogo nauchno-tekhicheskogo obshchestva radiotekhniki, elektroniki i svyazi im. A. S. Popova. Ser.: "Nauchnye Mezhdunarodnye simpoziumy. Problemy ekoinformatiki"* (Proc. Intern. Symp. Moscow Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications named after A. S. Popov. Ser. "Scientific Intern. Symp. Problems of Ecoinformatics"), F. A. Mkrtychyan (ed.), 2020, Issue 14, pp. 190–194 (in Russian).
5. Polishchuk Yu. M., Polishchuk V. Yu., Use of geo-simulation for forecasting the changes in sizes of thermokarst lakes in northern Western Siberia, *Kriosfera Zemli*, 2016, Vol. 20, No. 2, pp. 32–40 (in Russian).
6. Polishchuk Yu. M., Muratov I. N., Polishchuk V. Yu., Study of the tortuosity of the coastal boundaries of thermokarst lakes of Western Siberia using high-resolution images of Kanopus-V, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 130–137 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-130-137.
7. Polishchuk Yu. M., Muratov I. N., Baysalyamova O. A., Study of tortuosity of the coastal boundaries of thermokarst lakes of Bolshezemelskaya tundra using images of Kanopus-V images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 95–101 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-95-101.
8. Crapper P. F., Errors incurred in estimating an area of uniform land cover using Landsat, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1980, Vol. 46, No. 10, pp. 1295–1301.
9. Kupriyanov M., Kochergin G., Muratov I., Polishchuk Yu., Accuracy Analysis of Remote Measurement of Thermokarst Lakes Parameters for Field Dynamics Modeling Problems, *Proc. 8th Scientific Conf. Information*

Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020), Ser. *Advances of Social Science, Education and Humanities Research*, Atlantis Press, 2020, Vol. 174, pp. 237–241.

10. Olson D. M., Dinerstein E., Wikramanayake E. D., Burgess N. D., Powell G. V., Underwood E. C., D'amico J. A., Itoua I., Strand H. E., Morrison J. C., Loucks C. J., Allnutt T. F., Ricketts T. H., Kura Y., Lamoreux J. F., Wettengel W. W., Hedao P., Kassem K. R., Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth, *BioScience*, 2001, Vol. 51, Issue 11, pp. 933–938, DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2.
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, DOI:10.3897/issn2541-8416.2019.19.1.1.