

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОЩАДИ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР АРКТИКИ

Магистр Куприянов М.А., к.т.н. Кочергин Г.А., проф., д.ф.-м.н. Полищук Ю.М.

АУ «Югорский НИИ информационных технологий», Ханты-Мансийск, 628011, Россия

Статья посвящена вопросам оценки погрешностей дистанционного измерения площадей, периметров и степени извилистости береговых границ термокарстовых озер, рассматриваемых обычно в качестве удобных индикаторов климатических изменений в Арктической зоне. Для описания извилистости береговых границ озер использован показатель формы пространственных объектов, принятый в картоведении, который рассчитывается по результатам спутниковых измерений площади и периметра озер. Для исследования погрешностей дистанционного измерения параметров озер предложена методика построения случайных плоских геометрических фигур (модельных объектов) с заданной величиной степени извилистости. Исследована относительная погрешность измерения площади объекта по космическому снимку. Исследовано влияние сглаживания границ объектов на ошибки дистанционного измерения площадей. Показано, что сглаживание практически не влияет на погрешности дистанционного измерения площадей пространственных объектов по космическим снимкам.

Работа проводилась в рамках проекта по госзадаанию Департамента информационных технологий и цифрового развития Ханты-Мансийского автономного округа и частично при поддержке грантов по проектам РФФИ № 18-47-700001 и РФФИ № 19-07-00282.

Введение

Озера и другие поверхностные водоемы 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, что может вызвать рост концентрации метана в термокарстовых озерах. В задачах моделирования и прогнозирования динамики парниковых газов из термокарстовых озёр, обусловленных климатическими изменениями, возникает необходимость измерения геометрических характеристик озёр (площади, извилистости береговых границ и др.) по космическим снимкам. Проведенные в последнее время многочисленные дистанционные исследования динамики численности и размеров термокарстовых озер в Северной Евразии и Северной Америке [1-4] позволили создать геоимитационную модель динамики полей термокарстовых озер [5], пригодную для формирования прогнозных оценок динамики накопления озерного метана. Пространственная структура этой модели определяется совокупностью окружностей со случайными размерами и случайным расположением [5, 6].

Дистанционные исследования параметров реальных озер, проведенные в различных зонах мерзлоты (сплошная, прерывистая и островная) Западной Сибири и северо-востока Европейской части России, показали [7, 8], что поля термокарстовых озер можно рассматривать как совокупности случайных плоских фигур с существенно различающимися размерами (площадями) и с разной степенью извилистости границ. Согласно [8], практически все озера имеют извилистую форму береговых границ, значительно отличающуюся от окружности, которая была использована в геоимитационной модели. Поэтому важной является проблема оценки погрешностей дистанционного измерения площадей озер, возникающей из-за извилистости их береговых границ.

Вопросы оценки погрешности дистанционного измерения площади объекта рассматривались в [9-18]. В [9-11] исследована погрешность определения площади по космическим снимкам Landsat. В [15] рассмотрены вопросы точности измерения площадей озер по оптическим снимкам Landsat и по радиолокационным снимкам ERS-2 и установлена эмпирическая зависимость погрешности дистанционного измерения площади озера в зависимости от его размеров при использовании оптических и радиолокационных снимков среднего пространственного разрешения. В [16] найдена эмпирическая зависимость средней относительной ошибки оценки площади объекта от фактически измеренной площади с использованием данных Landsat 4, 5 и GeoEye-1. В [17] установлены эмпирические уравнения зависимости относительной погрешности измерения площади водоема от размеров водоемов и разрешающей способности снимка.

Отметим, что в [15-17] оценка погрешности дистанционного измерения площади объекта по космическим снимкам проводится путем сравнения с величиной площади этого же объекта, определяемой по снимкам значительно более высокого пространственного разрешения, которая выбирается в качестве истинной (эталонной) площади объекта. Более универсальным, по нашему

мнению, является анализ погрешности дистанционного определения площади объектов по космическим снимкам в зависимости от соотношения площади объекта и величины пространственного разрешения снимка. Такой подход позволяет оценивать точность определения площади по любым снимкам, указывая лишь их пространственное разрешение. Однако в общем случае рассматриваемая погрешность зависит и от степени извилистости границ объекта, что значительно усложняет исследование погрешности измерения площади объекта по космическим снимкам. При использовании снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения извилистость береговых границ может оказывать влияние на измерение площадей озёр, поэтому в практике таких измерений используют различные методы сглаживания. Однако вопросы оценки погрешностей измерения параметров озёр, возникающих при использовании процедур сглаживания, изучены недостаточно, в связи с чем актуальность настоящей работы не вызывает сомнения.

Дискретная природа растровых изображений, состоящих из пикселей, приводит к значительным погрешностям при измерении геометрических характеристик объекта – периметра, площади, а также производных от этих характеристик, например, извилистости границ или коэффициентов формы. Для снижения погрешности измерения геометрических характеристик оцифрованных по растровым изображениям объектов, например, по космическим снимкам, можно использовать различные методы сглаживания. Сравнение различных методов сглаживания представляет собой довольно трудоёмкую задачу. Поэтому нами был выбран один из наиболее известных методов сглаживания – метод Савицкого-Голея [18], основанный на построении методом наименьших квадратов аппроксимирующего полинома заданного порядка. Однако вопросы оценки погрешностей дистанционных измерений параметров термокарстовых озёр по сглаженным изображениям не рассматривались, что и определило цель работы.

Методические вопросы

В [7, 8] приведены экспериментальные данные о свойствах извилистости береговых линий реальных озёр. По данным спутниковых измерений рассчитаны величины показателя формы (степени извилистости границ) озёр по формуле [19]:

$$z = \frac{p^2}{4\pi s},$$

где s - площадь; p - периметр озера.

По спутниковым снимкам высокого разрешения Канопус-В установлено, что величина z для разных озёр изменяется в основном в интервале 1 - 12 (значение «1» соответствует окружности). Средние значения z в разных зонах мерзлоты Западной Сибири принимают, по данным [8], следующие значения: в островной зоне 3,5; в прерывистой 3,38 и в сплошной 2,95.

Рассмотрим методические вопросы анализа погрешностей дистанционного измерения параметров термокарстовых озёр. Для проведения анализа использованы совокупности модельных объектов (МО), методика формирования которых описана в [20]. Для моделирования процесса измерения по растровому изображению геометрических характеристик реального объекта, имеющего гладкую и непрерывную границу, применялась процедура растеризации, т.е. преобразования векторного типа данных в растровый. После растеризации происходило обратное конвертирование в векторный тип данных с сохранением искажений, внесённых при растеризации.

Растеризация проводилась с использованием программных средств ArcGIS Desktop по методике, подробно описанной в [21]. Растеризация проводилась таким образом, чтобы в результате преобразования расчётное количество заполненных пикселей изображения в границах модельного объекта, определяемое по формуле:

$$N = \frac{S}{R^2},$$

принимало бы значение, равное заданной величине N , выбираемой из последовательности значений 1, 2, 5, 10, 20, 50, и т.д. до 100 000. Здесь S – площадь модельного объекта; R – пространственное разрешение изображения.

Результаты

Для создания наборов модельных данных была использована методика формирования векторных модельных объектов [19]. С использованием методики было сгенерировано 10 выборочных последовательностей модельных объектов. В каждой выборке содержалось по 1 000 модельных объектов с величиной площади каждого, равной 10 000 м². Модельные объекты (МО) внутри одной выборки имели одинаковую величину z . Площадь растеризованных МО определялась по формуле:

$$S_u = N_u \times L^2,$$

где S_u – измеренная площадь растеризованного МО, м²;

N_u – измеренное количество пикселей в растеризованном МО;

L – пространственное разрешение растрового изображения, м.

Для каждой выборки были рассчитаны средние значения относительной погрешности измерения площадей растеризованных МО по формуле:

$$\delta_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i,$$

где δ_i – относительная погрешность измерения площади i -го растеризованного МО, которая рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{|S - S_u|}{S},$$

S – площадь МО, м²; S_u – измеренная площадь растеризованного МО, м².

Графики зависимости δ_m от N при разных значениях степени извилистости приведены на рисунке 1, из которого видно, что погрешность дистанционного измерения площади для объектов с $N > 10$ не превышает в среднем 8 %.

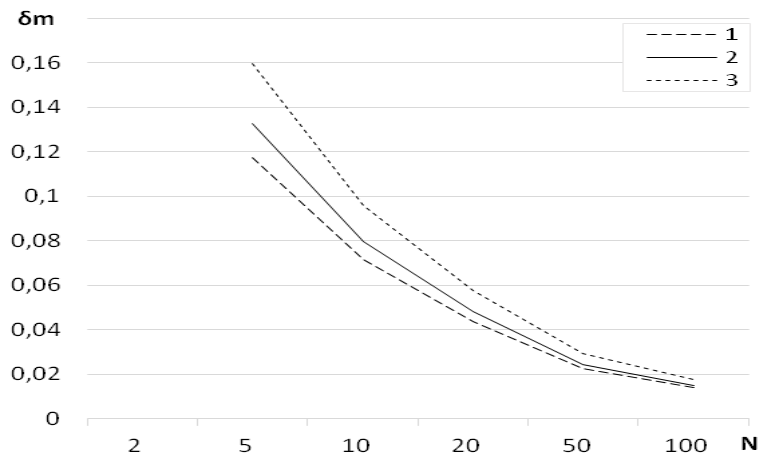


Рисунок 1. Зависимость погрешности измерения площадей от числа пикселей при разных значениях степени извилистости: нижний квартиль (1), медиана (2), верхний квартиль (3)

Рассмотрим влияние сглаживания границ объектов на погрешности измерения параметров пространственных объектов. Для определения величины параметров сглаживания методом Савицкого-Голея из всех модельных данных была создана ограниченная выборка, которая включала 10 случайных модельных объектов и соответствующие им растеризованные представления в количестве 160 шт. с различной величиной z . Далее с использованием языка программирования Python, библиотеки SciPy [22], производилось сглаживание растеризованных модельных объектов методом Савицкого-Голея.

Результат сравнения погрешностей измерения площади объектов со сглаженными и несглаженными границами приведен на рисунке 2, который показывает незначительность различий двух графиков при разных N . Следовательно, сглаживание береговых границ озер

практически не оказывает заметного влияния на погрешность дистанционного измерения их площадей.

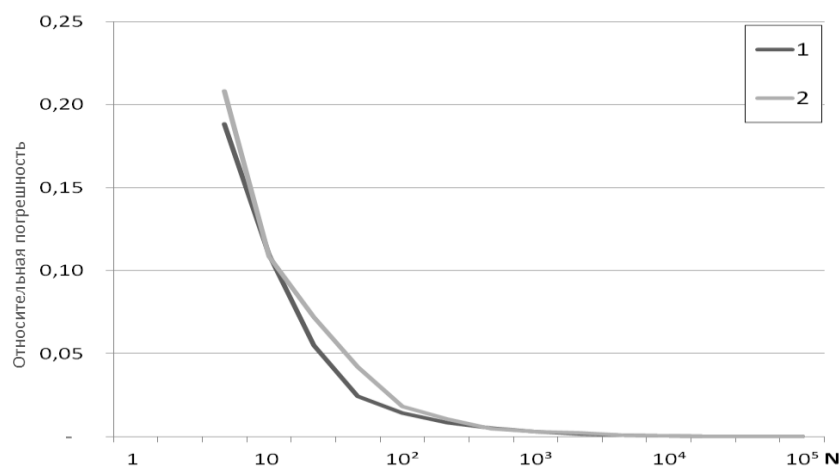


Рисунок 2. Сравнение относительной погрешности определения площади растеризованных (1) и сглаженных (2) объектов

Литература

1. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting // *International Journal of Environmental Studies*, 2009. Vol. 66. No. 4. P. 423–431.
2. Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003. Vol. 14. P. 19–27,
3. Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // *J. Geophys. Res.*, 2006. Vol. 111. G04002.
4. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalén, Northern Sweden, especially 1960–1997 // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000. Vol. 11. P. 55–69,
5. 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*. Ed. O. Pokrovsky. New York: Nova Science Publishers, 2014. P. 205–234.
6. Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты. – Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. 129 с.
7. Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Дистанционные исследования изменчивости формы береговых границ термокарстовых озер в вечной мерзлоте Западной Сибири // *Исследование Земли из космоса*, 2012. Том. 1. С. 61–64,
8. Полищук Ю.М., Муратов И.Н., Полищук В.Ю. Изучение извилистости береговых границ термокарстовых озер Западной Сибири с использованием снимков высокого разрешения Канопус-В // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2019. Том. 16. № 5. С. 130–137,
9. 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. P. 1295–1301,
10. Crapper P.F. Geometric properties of regions with homogeneous biophysical characteristics // *Australian Geographical Studies*, 1981. Vol. 19. No. 1. P. 117–124,
11. Crapper P.F. An estimate of the number of boundary cells in a mapped landscape coded to grid cells // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1984. Vol. 50. No. 10. P. 1497–1503.
12. Crapper P.F., Walker P.A., Manninga P.M. Theoretical prediction of the effect of aggregation on grid cell data sets // *Geo-Processing*, 1986. Vol. 3. No. 2. P. 155–166,
13. Frolov Y.S., Maling D.H. The accuracy of area measurement by point counting techniques // *The Cartographic Journal*, 1969. Vol. 6. No. 1. P. 2–35,
14. Lloyd P. R. Quantisation error in area measurement // *The Cartographic Journal*, 1976. Vol. 13. No. 1. P. 22–25,
15. Bryksina N.A., Polishchuk Y.M. Research of remote measurement accuracy of lake areas using space images // *Geoinformatika*, 2013. No. 1. P. 64–68,

16. Королева Н. В., Ершов Д. В. Оценка погрешности определения площадей ветровалов по космическим снимкам высокого пространственного разрешения Landsat-TM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012. Том 9. № 1. С. 80–86.
17. Корниенко С. Г. Оценка погрешности измерения площади водоемов в криолитозоне по данным космической съемки различного пространственного разрешения // Криосфера Земли, 2014. Том 18. № 4. С. 86–93.
18. Savitzky A., Golay M. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // Analytical chemistry, 1964. Vol. 36. No. 8. P. 1627-1639. doi:10.1021/ac60214a047
19. Берлянт А.М. Картографический метод исследования. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 257 с.
20. Куприянов М.А., Кочергин Г.А., Полищук Ю.М. Accuracy analysis of remote measurement of spatial objects area based on modeling // Bulletin of Ugra State University, 2018. No. 3. P.25-34,
21. How Polygon To Raster works [сайт]: // ESRI: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/conversion-toolbox/how-polygon-to-raster-works.htm> (дата обращения: 27.02.2020).
22. Описание вызова функции `scipy.signal.savgol_filter` в библиотеке SciPy [сайт]: The Scipy community // https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.16.1/reference/generated/scipy.signal.savgol_filter.html (дата обращения 28.02.2020).

ANALYSIS OF ERRORS OF REMOTE MEASUREMENT OF THE THERMOKARST LAKES AREAS IN THE ARCTIC

М.А. Kupriyanov, G.A. Kochergin, Y.M. Polishchuk

Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, 628011, Russia

The article is devoted to the issues of estimating the errors of remote measurement of areas of the thermokarst lakes, usually considered as convenient indicators of climatic changes in the Arctic zone. To describe the tortuosity of the coastal boundaries of the lakes, we used an indicator of the shape of spatial objects adopted in cartography, which is calculated from satellite measurements of the area and perimeter of lakes. To study the errors of remote measurement of the parameters of lakes, a method for constructing random flat geometric figures (model spatial objects) with a given value of the degree of tortuosity is proposed. The relative error of measuring the area of an object from a satellite image is investigated. The effect of smoothing the boundaries of objects on the errors of remote measurement of areas is investigated. It is shown that smoothing practically does not affect the errors of remote measurement of spatial objects areas from satellite images.