

ДИСТАНЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ТУНДРЫ

Гл. специалист Муратов И.Н.¹, гл. специалист Богданов А.Н.¹, к.т.н. Полищук В.Ю.^{2,3}, гл. специалист Байсаямова О.А.¹, проф., д.ф.-м.н. Полищук Ю.М.¹.

¹АУ «Югорский НИИ информационных технологий», 628011, г. Ханты-Мансийск, Россия

²ФГБУН "Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН", 634021, г. Томск, Россия

³Томский политехнический университет, Томск, 534004, Россия

Статья посвящена вопросам исследования распределения термокарстовых озер Большеземельской тундры по их размерам. С целью построения эмпирических гистограмм распределения площадей термокарстовых озер, учитывающих всю совокупность озер – от самых малых до больших размеров – во всех трех зонах мерзлоты (островной, прерывистой и сплошной) был использован разработанный ранее подход к построению общей (синтезированной) гистограммы, основанный на объединении двух исходных гистограмм, полученных по снимкам сверхвысокого (GeoEye-1) и среднего (Landsat-8) пространственного разрешения. Дистанционные исследования проведены на территории криолитозоны Большеземельской тундры. Для определения числа и площадей озер больших размеров использована мозаика снимков Landsat-8 за 2017-2018 гг. Исследования свойств малых озер проведены на 11 тестовых участках, расположенных достаточно равномерно на той же территории. Рассмотрены методические вопросы проведения указанного объединения исходных гистограмм распределения озер по площадям, полученным по снимкам разного разрешения для территории криолитозоны Большеземельской тундры. Синтезированная гистограмма распределения озер по площадям представлена в виде графика в двойном логарифмическом масштабе, обеспечивающем ее компактное представление в очень широком диапазоне изменения размеров озер от 2 до 10⁸ м². Статистический анализ эмпирической синтезированной гистограммы показал, что она соответствует теоретическому логнормальному закону распределения, согласно критерию Пирсона, на уровне значимости 0,99. Логнормальный закон распределения, представляющий озера во всем диапазоне их размеров, позволяет учитывать и малые озера, которые рассматриваются как интенсивные источники эмиссии метана и углекислого газа в атмосферу из термокарстовых озер.

1. Введение

Наблюдающийся в последние десятилетия рост среднегодовой температуры земной поверхности приводит к деградации мерзлотных ландшафтов северных территорий России, перспективных для хозяйственного освоения в ближайшие годы в связи с планами ускоренной добычи углеводородов. По оценке экспертов, потепление климата сопровождается ростом экономических и экологических ущербов предприятий российского нефтегазового комплекса, расположенных в зоне многолетней мерзлоты. Для разработки мероприятий по снижению ущербов необходимо проведение исследований динамики мерзлотных ландшафтов в условиях глобального потепления.

Известно, что наиболее чувствительными к температурным изменениям на территории многолетней мерзлоты оказываются термокарстовые озерные ландшафты. Для дистанционного изучения геокриологических изменений на территориях многолетней мерзлоты по космическим снимкам в качестве индикаторов геокриологических изменений обычно используются термокарстовые озёра, хорошо дешифрируемые на космических изображениях. Как показано в (Polishchuk et al., 2014), таяние мерзлоты в условиях современного потепления климата приводит к ускорению термокарстовых процессов, что проявляется в изменении числа и площадей термокарстовых озер в зоне мерзлоты.

Доминирующая роль малых термокарстовых озер (площадью менее 0,01-0,05 га) в накоплении метана была установлена (Pokrovsky et al., 2011) в зоне вечной мерзлоты Западной Сибири. Тем не менее, вклад миллионов таких озер в глобальный парниковый эффект из-за небольших размеров часто не принимается во внимание. Попытки учесть их при оценке общего объема мировых запасов метана в (Holgerson and Raymond, 2016), основанные на использовании теоретического степенного закона распределения озер по размерам из-за отсутствия экспериментальных данных, вызывают большие сомнения, поскольку степенной закон не подтверждается экспериментальными данными (Cael and Seekell, 2016). Это требует проведения исследований распределения озер по размерам с учетом малых термокарстовых озер, которые позволили бы учесть вклад миллионов малых озер в общий объем запасов метана на обширных северных территориях.

К настоящему времени обширные дистанционные исследования в Арктической зоне проведены на территории Аляски, в Сибири и в некоторых других регионах. Насколько нам известно, аналогичных исследований термокарстовых озер в Большеземельской тундре не проводилось. В связи с этим целью настоящей работы явилось дистанционное изучение

особенностей изменений численности и площадей термокарстовых озер в криолитозоне Большеземельской тундры.

2. Данные и методы

Исследования распределения озер в настоящей работе проводились в криолитозоне Большеземельской тундры с использованием космических снимков сверхвысокого разрешения GeoEye-1 (разрешение 0,6 м) в сочетании со снимками Landsat-8 среднего разрешения (30 м). Все снимки выбирались в достаточно короткий период летнего сезона (конец июня - август) для минимизации влияния сезонных колебаний уровня воды в озерах. В этот период полностью исчезает ледовый покров на озерах, мешающий их выделению при дешифрировании снимков. Обработка космических снимков, проведенная с использованием стандартных средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3, была направлена на получение данных о численности и площадях озер с существенно различающимися размерами с целью построения гистограммы распределения озер в очень широком диапазоне их размеров.

Площадь территории исследования 195 тыс. км²

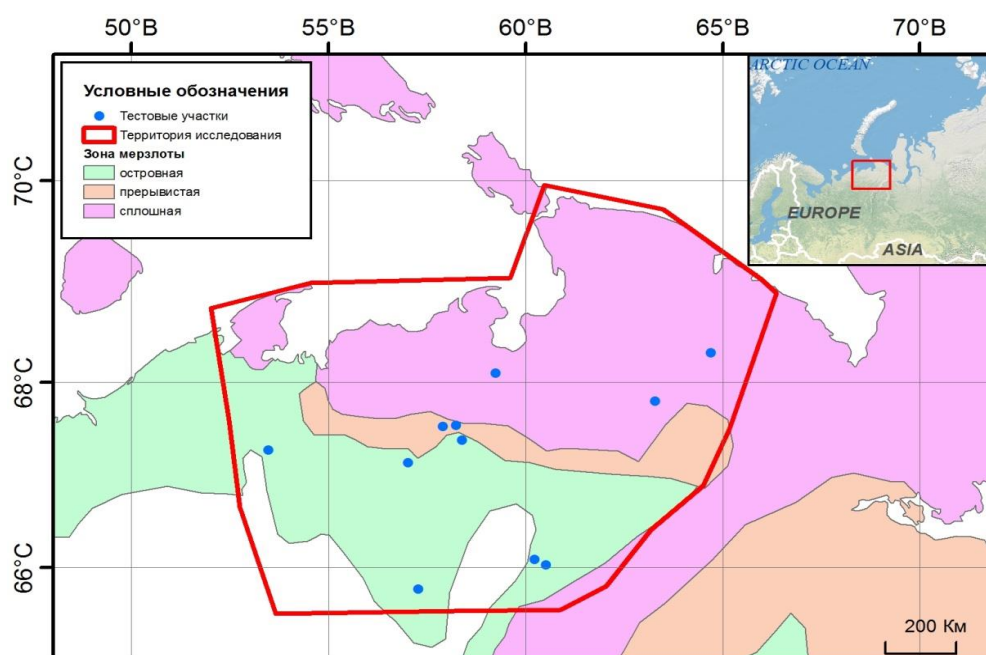


Рисунок 1. Схема размещения зон мерзлоты на территории Большеземельской тундры с показанными местами расположения тестовых участков

3. Результаты

Исследования распределения озер в настоящей работе проводились в криолитозоне Большеземельской тундры с использованием космических снимков сверхвысокого разрешения GeoEye-1 в сочетании со снимками Landsat-8. Обработка космических снимков, проведенная с использованием стандартных средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3, была направлена на получение данных о численности и площадях озер с существенно различающимися размерами с целью построения гистограммы распределения озер в очень широком диапазоне их размеров - от нескольких метров до десятков километров.

Построение такой гистограммы распределения площадей озер в чрезвычайно широком диапазоне изменения их размеров (от единиц м² до сотен км²) по спутниковым снимкам осуществлено по методике, изложенной в нашей работе (Полищук и др. 2018), в которой предложена 3-х этапная процедура построения гистограммы на основе интеграции спутниковых данных о площадях и численности озер. Такая гистограмма является результатом синтеза двух исходных гистограмм распределения озер, получаемых раздельно по снимкам сверхвысокого (СВР) и среднего (СР) разрешения. В связи с необходимостью построения единой гистограммы

распределения площадей озер на основе синтеза (объединения) двух исходных гистограмм распределения озер предлагается для построения гистограмм выбирать частичные интервалы с неравномерным шагом (по логарифмическому закону), а именно: 2-5 м², 5-10 м², 10-20 м², 20-50 м² и т.д. до 20 000 га, что позволяет представить данные о распределении озер по интервалам их размеров достаточно компактно в очень широком диапазоне изменений площадей озер. Всего было выбрано 23 частичных интервалов площадей.

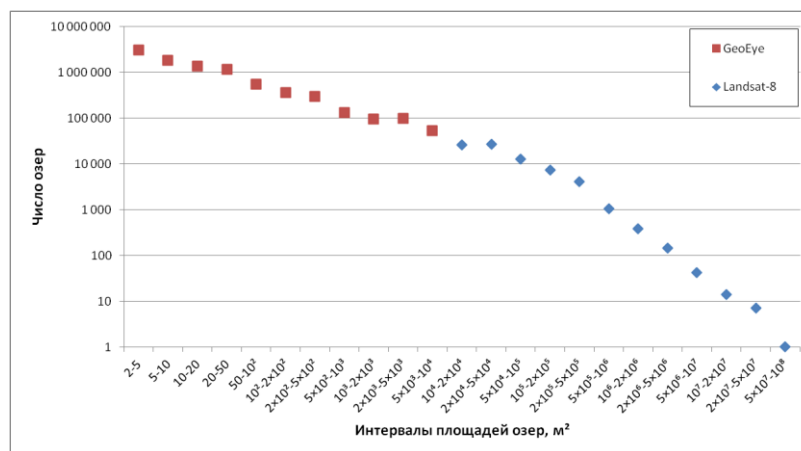
Приведем ниже перечень этапов этой процедуры.

Этап 1. Построение гистограммы распределения озер по площадям, определяемым по снимкам СР, с целью учета озер преимущественно больших размеров.

Этап 2. Построение гистограммы распределения озер по площадям, определяемым по снимкам СВР с целью учета озер сравнительно малых размеров.

Этап 3. Объединение (синтез) двух исходных гистограмм распределения озер, полученных на предыдущих этапах, в единую гистограмму распределения площадей озер, учитывающую озера в широком диапазоне размеров - от малых до больших размеров.

Для получения исходной гистограммы распределения озер сравнительно больших размеров с целью наиболее полного учета озер в криолитозоне Большеземельской тундре была составлена мозаика снимков Landsat-8 за период 2017-2018 гг., с использованием которой были определены суммарная площадь озер и их общая численность. Минимальный размер выделяемых на снимках озер был выбран равным 0,5 га, что соответствует размеру площади приблизительно 6 пикселей. В результате обработки мозаики космических снимков Landsat-8 средствами ArcGIS 10.3 были получены векторные слои озер на территории криолитозоны Большеземельской тундре, позволившие определить число и площади озер крупнее 0,5 га. Полученные данные о числе и площадях озер на исследуемой территории, распределенные по указанным выше частичным интервалам площадей в логарифмическом масштабе, представлены в виде первой исходной гистограммы распределения площадей озер с размерами от 1×10^4 до 1×10^8 м² на рис. 2 (синие ромбы).



тестовым участкам) в каждом интервале области перекрытия двух исходных гистограмм. В нашем случае получено значение коэффициента экстраполяции $K = 839$. Распределяя расчетное число озер на исследуемой территории, полученное на основе экстраполяции данных со снимков GeoEye-1, по интервалам площадей, построим вторую исходную гистограмму распределения озер по их площадям, которая отображается на рис. 2 красными квадратами в диапазоне изменения площадей от 2 до $1 \times 10^4 \text{ м}^2$.

Рассмотрим создание единой (синтезированной) гистограммы распределения площадей озер (3-й этап) в широком диапазоне их размеров на основе объединения (синтеза) двух исходных гистограмм. На рис. 1 эти исходные гистограммы имеют перекрывающуюся область (перекрывающиеся интервалы) шириной 5 интервалов в диапазоне от 5×10^3 до $2 \times 10^5 \text{ м}^2$. Согласно (Брыксина, Полищук, 2013), практически приемлемая погрешность дистанционного измерения площади озера с изображений среднего разрешения достигается при размерах озер 2 га ($2 \times 10^4 \text{ м}^2$) и более. Поэтому синтезированную гистограмму распределения площадей озер можно получить путем «сшивания» двух исходных гистограмм в точке, соответствующей площади $2 \times 10^4 \text{ м}^2$.

Синтезированная гистограмма, полученная в результате этого «сшивания», представляет распределение озер в широком диапазоне размеров озер от 2 до $1 \times 10^8 \text{ м}^2$. Заметим, что общее число озер криолитозоны Большеземельской тундры составляет 8,96 млн. с общей площадью около 7,8 тыс. км². Из них 99 % являются малые озера, общая площадь которых составляет около 15 % от суммарной. Однако крупные озера (более $1 \times 10^4 \text{ м}^2$), численность которых не превышает 1% от их общего количества, составляют 85 % от общей площади озер.

В связи с выше изложенным возникает необходимость определения вида теоретического закона распределения озер по размерам, более соответствующего эмпирическим данным, чем степенной закон. Выполненная проверка соответствия эмпирической гистограммы теоретическому логнормальному распределению с использованием критерия Пирсона показала, что распределение озер по размерам может быть принято соответствующим логнормальному закону с высокой вероятностью 0,99.

Исследование проводилось при финансовой поддержке Правительства Томской области и частично грантов Российского фонда фундаментальных исследований по проектам № 18-47-700001, № 18-45-860002, № 18-45-703001 и № 19-07- 00282.

Литература

1. Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Исследование точности дистанционного измерения площадей озер с использованием космических снимков // Геоинформатика. 2013. № 1. С. 64–68.
2. Holgerson M.A., Raymond P.A. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds // Nature Geoscience Letters. 2016. Vol. 9. P. 222-226.
3. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., Dupre B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia // Biogeosciences. 2011. Vol. 8. P. 565-583.
4. Polishchuk Yu, Kirpotin S., and Bryksina N. Remote study of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Chapter 5 // In Book: Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems (Edited by O. Pokrovsky), New York: Nova Science Publishers. 2014. P. 173-204.
5. Cael B.B., Seekell D.A., 2016, The size-distribution of Earth's lakes. Sci. Rep. 6, 29633, doi: 10.1038 / srep29633.
6. Полищук Ю. М., Богданов А. Н., Брыксина Н. А., Муратов И.Н., Полищук В.Ю. Интеграция космических снимков сверхвысокого и среднего разрешения для построения гистограмм распределения площадей термокарстовых озёр в расширенном диапазоне их размеров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 38-46.

REMOTE STUDY OF THERMOKARST LAKES OF THE BOLSHEZEMELSKAYA TUNDRA

Muratov I.N.¹, Bogdanov A.N.¹, Polishchuk V.Y.^{2,3}, Baisalyamova O.A.¹, Polishchuk Y.M.¹

¹Ugra Research Institute of Information Technology, Khanty-Mansiysk, 628011, Russia

²Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia

³Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, 634021, Russia

The article is devoted to the study of the distribution of thermokarst lakes of the Bolshezemelskaya tundra according to their size. In order to build empirical histograms of the distribution of areas of thermokarst lakes, taking into account the entire set of lakes - from the smallest to the largest sizes - in all three zones of permafrost (insular, intermittent and continuous), the previously developed approach to the construction of a common (synthesized) histogram based on combining two source histograms obtained from ultrahigh (GeoEye-1) and medium (Landsat-8) spatial resolution images. Remote studies were carried out on the territory of the cryolithozone of the Bolshezemelskaya tundra. A mosaic of Landsat-8 images for 2017-2018 was used to determine the number and areas of large lakes. Studies of the properties of small lakes were carried out on 11 test plots located fairly evenly in the same area. The methodological issues of carrying out the aforementioned combination of the initial histograms of the lakes size-distribution obtained from different resolution images using data for the territory of the Bolshezemelskaya tundra cryolithozone are considered. The synthesized histogram of the lakes size-distribution is represented as a graph on a double logarithmic scale, ensuring its compact representation in a very wide range of changes in the size of lakes from 2 to 108 m². Statistical analysis of the empirical synthesized histogram showed that it corresponds to the theoretical lognormal distribution law, according to the Pearson criterion, at a significance level of 0.99. The log-normal distribution law, representing lakes in the whole range of their sizes, allows taking into account small lakes, which are considered as intense sources of methane and carbon dioxide emission into the atmosphere from thermokarst lakes.