

ПРОБЛЕМЫ ГЕОИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР АРКТИКИ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ

Проф., д.ф.-м.н. Полищук Ю.М.¹, гл. специалист Муратов И.Н.¹, к.т.н. Полищук В.Ю.^{2,3}, гл. специалист Куприянов М.А.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

На основе геоимитационного и эвристического подходов разработана новая модель пространственной структуры полей термокарстовых озер, которая учитывает логнормальное распределение озер по размерам и извилистость их береговых границ. Экспериментальное обоснование логнормального распределения озер по размерам дано на основе результатов дистанционных исследований эмпирического распределения площадей термокарстовых озер в очень широком диапазоне их размеров в зоне вечной мерзлоты на основе совместного использования спутниковых снимков среднего и высокого пространственного разрешения полученных для северных территорий Западной Сибири. На основе использования разработанной авторами методики интеграции данных со снимков среднего и высокого пространственного разрешения была разработана синтезированная эмпирическая гистограмма распределения озер по размерам применительно к территории вечной мерзлоты Западной Сибири. Результаты проверки соответствия этого закона эмпирической гистограмме показали, что логнормальный закон соответствует экспериментальным данным, 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. С использованием спутниковых снимков определены статистические характеристики извилистости береговых границ озер, учтенные при разработке новой модели. Описан алгоритм моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер.

Введение

Современное глобальное потепление климата ускоряет деградацию вечной мерзлоты. Вечная мерзлота, являющаяся хранилищем консервированного углерода в обширных замороженных торфяных болотах Северной Евразии, может стать источником еще большего потепления с выбросом парниковых газов, что приведет к формированию новых больших вызовов для мирового сообщества, связанных с нарушением взаимодействия человека и природы. Разработка мер по недопущению повышения среднегодовой температуры более чем на 2 градуса к 2050 году в соответствии с решениями Всемирного саммита по климату (Париж, 2015 г.) невозможна без обоснованных прогнозов динамики запасов метана в озерах северных территорий на ближайшие десятилетия, что требует совершенствования методов и средств моделирования динамики полей термокарстовых озер в зоне вечной мерзлоты. Доминирующая роль малых термокарстовых озер (площадью менее 0,01-0,05 га) в накоплении метана была установлена [1] 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 [2], 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 [3]. Это потребовало разработки новых методов и средств моделирования динамики полей термокарстовых озер, которые позволили бы учесть вклад миллионов малых озер в общий объем запасов метана на обширных территориях Северной Евразии.

Согласно Моисееву и Свирежеву [4], имитационное моделирование является одним из наиболее важных типов математического моделирования, который может быть использован для построения модели полей термокарстовых озер с точностью, достаточной для получения прогнозных оценок. Для моделирования пространственных объектов Полищук и Токарева [5], Чжао и Мураяма [6] ввели геоимитационное моделирование.

Пространственная природа и высокая степень сложности полей термокарстовых озер как объектов моделирования обуславливает необходимость использования геоимитационного моделирования [7]. Важнейшей задачей является разработка геоимитационной модели полей термокарстовых озер, под которой понимается математическая модель, воспроизводящая пространственную структуру полей термокарстовых озер путем моделирования формы, размера и относительного положения озер на исследуемой территории, с учетом экспериментально установленных статистических законов их случайного расположения и распределения по размерам. Разработка упрощенной модели была рассмотрена в [8,9], в которой использовались экспериментальные данные о свойствах озер в зоне вечной мерзлоты Западной Сибири, полученные со снимков среднего разрешения (30 м) Landsat, на которых не видны малые озера. Поэтому для

учета малых озер необходимо использовать снимки высокого разрешения. Кроме этого упрощенная модель не учитывала естественную извилистость береговых границ реальных озер, что и определило в качестве основной цели данной работы рассмотрение вопросов моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер на основе учета случайной извилистости формы границ озер и вида закона распределения озер по размерам, учитывающего озера всех размеров, включая малые.

2. Статистические свойства полей термокарстовых озер в зоне мерзлоты по экспериментальным данным на основе космических снимков

Дистанционное исследование формы границ термокарстовых озер, проведенное в [10], показало возможность выбора окружности в качестве упрощенной модели озера для геоимитационной модели поля термокарстовых озер. Поэтому упрощенная геоимитационная модель, разработанная ранее в [8,9], не учитывала многочисленные малые озера и извилистость береговых границ реальных озер. Усовершенствование геоимитационной модели предполагало представление поля термокарстовых озер в виде совокупностей случайных плоских фигур с извилистыми границами. Для определения свойств таких фигур требуется проведение дополнительных дистанционных исследований с целью получения экспериментальных данных о характеристиках извилистости береговых линий озер и распределении озер по площадям в широком диапазоне размеров, включая малые озера. Проведенные нами в последнее время дистанционные исследования на территории Западной Сибири использовали космические снимки среднего и высокого разрешения, полученные за сравнительно короткий период летнего сезона (конец июня - август) для уменьшения влияния сезонных колебаний уровня воды в озерах. Исследование по снимкам Канопус-В высокого разрешения (2,1 м) было проведено на 78 тестовых участках, схема расположения которых в различных зонах вечной мерзлоты Западной Сибири представлена в [11].

Одной из важных становится задача построения гистограмм распределения озер по размерам, которые бы учитывали все озера в широком диапазоне размеров - от десятков метров до десятков километров. При построении таких гистограмм распределения озер и их суммарных (общих) площадях по размерам озер была использована методика [12,13] интеграции данных о числе и площадях водоемов, полученных по спутниковым снимкам среднего и высокого разрешения. В соответствии с этой методикой синтезированная гистограмма распределения озер по площадям была получена путем «сшивания» двух исходных гистограмм, первая из которых основана на данных Landsat-8 и представляет большие озера (размером от 0,5 до 20 000 га). Вторая исходная гистограмма, полученная по данным со снимков Канопус-В, включает малые озера (от 0,005 до 20 га). Синтезированные гистограммы распределения числа и общей площади озер, полученные выше описанным образом по результатам проведенных исследований в зоне мерзлоты Западной Сибири, представлены в [11]. Статистический анализ показал [14], что эмпирическое распределение соответствует логнормальному закону по критерию Пирсона с вероятностью 0,99.

Проведено экспериментальное исследование свойств извилистости береговых линий реальных озер. По данным спутниковых измерений рассчитаны величины показателя формы (степени извилистости границ) озер по формуле [15]:

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

где s - площадь; p - периметр озера.

Определение величины z было проведено по данным со снимков Канопус-В на всех 78 тестовых участках. Установлено, что распределение величины степени извилистости z также соответствует по критерию Пирсона логнормальному закону распределения.

3. Геоимитационная модель пространственной структуры полей термокарстовых озер

На основании вышеизложенного предложена усовершенствованная геоимитационная модель полей термокарстовых озер в виде совокупности случайных плоских фигур, геометрическая интерпретация которой показана на рисунке 1, где обозначено: s_i – площадь i -го модельного озера; i – номер озера.

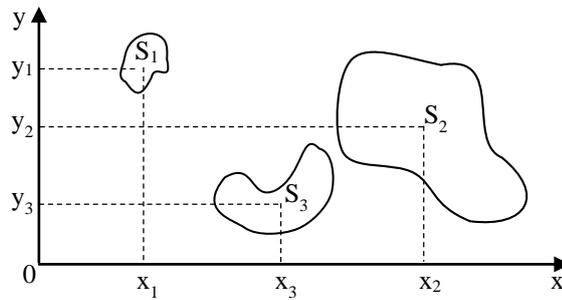


Рисунок 1. Модельное представление фрагмента полей термокарстовых озер

Для создания плоских фигур с использованием эвристического подхода разработана методика формирования модельных объектов, которая позволяет генерировать объекты произвольной формы с заданной площадью и степенью извилистости в декартовой системе координат. Методика выполняется в виде последовательности следующих этапов:

1. Создание полигона со случайным количеством вершин.
2. Соединение вершин полигона непрерывной линией с использованием кривых Безье [16], что позволяет создать модельный объект со случайной извилистостью контура границы z .
3. Преобразование модельного объекта к его виду с заданной площадью при сохранении исходной величины z .

4. Алгоритмические вопросы моделирования полей термокарстовых озер

Для моделирования полей термокарстовых озер используются четверки псевдослучайных чисел, представляющих координаты центров плоских фигур, степень извилистости границ и величину их площади и формируемые с помощью метода Монте-Карло. В общем случае взаимная плотность вероятностей случайных координат центров, степени извилистости и площадей плоских фигур, имитирующих озера в математической модели случайных полей термокарстовых озер может быть представлена в виде:

$$f(x, y, z, s), \quad (1)$$

где x и y - координаты центра плоской фигуры в модели; z - степень извилистости границ; s - площадь плоской фигуры, имитирующей озеро.

Следовательно, множество плоских фигур в модели озерных полей будет представлено в виде последовательности четверок случайных величин. Для разработки алгоритма моделирования полей термокарстовых озер необходимо учитывать вид законов распределения величин x , y , z , s и статистические зависимости между изменениями этих величин, которые, согласно экспериментальным данным [8], могут быть приняты статистически независимыми. С учетом этого совместная плотность вероятности (1) может быть представлена в виде:

$$f(x, y, z, s) = f(x) \times f(y) \times f(z) \times f(s), \quad (2)$$

где $f(x)$ и $f(y)$ - плотности вероятности равномерного распределения; $f(z)$ и $f(s)$ - плотности вероятности логнормального закона распределения в виде

$$f(s) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(\ln s - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где μ - математическое ожидание, σ - стандартное отклонение.

С учетом уравнения (2) генерация последовательности случайных чисел, определяющих характеристики расположения центров плоских фигур, осуществляется с использованием генератора псевдослучайных чисел, распределенного по закону равномерной плотности. Для моделирования озер со случайными размерами, площади которых распределены по логнормальному закону (3), генерируются последовательности псевдослучайных чисел, распределенных по логнормальному закону, в соответствии с уравнением [17]:

$$s_i = \exp(\mu + \sigma \times r), \quad (4)$$

где r - псевдослучайное число, распределенное по нормальному закону, рассчитанное как

$$r = j - 112q_j - 6, \quad (5)$$

где q_j - случайная величина, равномерно распределенная на интервале $[0, 1]$.

Результатом работы программного комплекса геоимитационного моделирования являются поля модельных озер, площади которых и степень извилистости береговых границ распределены по логнормальному закону.

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. 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.
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. Cael B.B., Seekell D.A. The size-distribution of Earth's lakes // Sci. Rep. 2016. 29633.
4. Моисеев Н.Н., Свиричев Ю.М. Системный анализ динамических процессов биосферы // Вестник Академии Наук СССР. 1979. № 2. С. 47-54
5. Полищук Ю.М., Токарева О.С. Геоимитационное моделирование зон атмосферного загрязнения в результате сжигания газа на нефтяных месторождениях // Информационные системы и технологии. 2010. № 2. С. 39-46.
6. Zhao Y., Murayama Y. Urban dynamics analysis using spatial metrics geosimulation. Spatial analysis and modeling in geographical transformation process // Dordrecht-Heidelberg-New-York-London: Springer, GeoJournal Library. 2011. № 10. P. 153–167.
7. Polishchuk Y.M., Polishchuk V.Y. Using geo-simulation for predicting changes in the sizes of thermokarst lakes in northwestern Siberia // Kriosfera Zemli. 2016. vol. 20. P. 29-36.
8. Polishchuk V.Y., Polishchuk Y.M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost // New York: Nova Science Publishers. 2014. № 6. P. 205-234.
9. Polishchuk Y. M., Polishchuk V. Y. Forecast of thermokarst lakes dynamics in permafrost based on geo-simulation modeling and remote sensing data // Proc. of Conf. "Mathematical and Information Technologies MIT-2016". Serbia, Vrnjacka Banja – Montenegro, Budva, 2017. vol. 1839. P. 393-405.
10. Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Дистанционное исследование изменчивости формы береговых границ термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири // Исследование Земли из космоса. 2012. № 1. С. 61-64.
11. Polishchuk Y.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Polishchuk V.Y., Lim A., Manasypov 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. P. 1-16.
12. Полищук Ю.М., Богданов А.Н., Брыксина Н.А. 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.
13. Полищук Ю.М., Богданов А.Н., Муратов И.Н. Методические вопросы построения обобщенных гистограмм распределения площадей озер 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.
14. Полищук Ю.М., Богданов А.Н., Брыксина Н.А. Опыт и результаты дистанционного исследования озёр криолитозоны Западной Сибири по космическим снимкам различного разрешения за 50-летний период // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса 2017. Т. 14. № 6. С. 42-55.
15. Берлянт А.М. Картографический метод исследования. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978.-257 с.
16. Nan X.A., Ma Y.C., Huang X.L. The Cubic Trigonometric Bézier Curve with Two Shape Parameters // Applied Mathematics Letters. 2009. Vol. 22. № 2. P. 226-231.
17. Дубнер П.Н. Справочник по статистическим распределениям. – 2000; URL:<http://algotlist.manual.ru/math/matstat/logNormal/index.php> (дата обращения: 01.07.2018).

PROBLEMS OF GEO-SIMULATION OF THE THERMOCARST LAKES FIELDS OF ARCTIC USING SATELLITE IMAGES

Polishchuk Y.M.¹, Muratov I.N.¹, Polishchuk V.Y.^{2,3}, Kupriyanov M.A.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;

On the basis of geo-simulation and heuristic approaches, a new model of the spatial structure of thermokarst lakes fields has been developed, which takes into account the log-normal distribution of lakes in size and tortuosity of their coastal boundaries. Experimental substantiation of the log-normal size-distribution of lakes is based on the results of remote sensing studies of the empirical distribution of areas of thermokarst lakes in a very wide range of their sizes in the permafrost zone. The empirical size-distribution of lakes is based on the integration of satellite images of medium and high spatial resolution obtained for the northern territories of Western Siberia. Based on the use of the methods developed by the authors for integrating data from medium and high spatial resolution images, a synthesized empirical histogram of the lake size-distribution in the permafrost of Western Siberia was created. The results of the verification of compliance of this law with the empirical histogram showed that the log-normal law corresponds to the experimental data, according to the Pearson criterion, at a significance level of 0.99. The log-normal distribution law, representing lakes in the wide range of their sizes, allows taking into account small lakes, which are considered as intensive sources of methane and carbon dioxide emission into the atmosphere from thermokarst lakes. The statistical characteristics of the tortuosity of the coastal boundaries of the lakes determined using satellite images were taken into account when developing a new model. An algorithm for modeling the spatial structure of the fields of thermokarst lakes is described.