ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА 2018 г. Выпуск 3 (50). С. 88–100

DOI: 10.17816/byusu2018088-100 УДК 551.34;551.58

В. Ю. Полищук, И. Н. Муратов, Ю. М. Полищук

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (договоры № 18-47-700001, № 18-45-860002 и № 18-45-703001), Администрации Томской области и Департамента образования и молодежной политики ХМАО-Югры

Рассмотрены вопросы моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири на основе геоимитационного подхода. Изложены основные принципы разработки геоимитационной модели структуры полей термокарстовых озер. Приводятся экспериментальные данные о свойствах озерных полей, полученных на основе интеграции спутниковых снимков высокого и среднего разрешения. Анализ данных показал, что эмпирическая гистограмма распределения озер по размерам аппроксимируется логнормальным законом распределения по критерию Пирсона с вероятностью 0,99. Этот закон распределения, в отличие от обычно используемого в таких исследованиях степенного закона распределения озер по размерам, учитывает и малые озера, рассматриваемые как интенсивные источники эмиссии метана в атмосферу из термокарстовых озер. Дан пример моделирования поля термокарстовых озер с логнормальным законом распределения их по размерам.

Ключевые слова: дистанционные методы, спутниковые снимки, геоинформационные системы, вечная мерзлота, Западная Сибирь, геоимитационное моделирование, термокарстовые озера, распределение озер по размерам.

V. Y. Polishchuk, I. N. Muratov, Y. M. Polishchuk

PROBLEMS OF MODELING THE SPATIAL STRUCTURE OF THERMOKARST LAKE FIELDS IN THE PERMAFROST BASED ON SATELLITE IMAGERY

The problems of modeling the spatial structure of the fields of thermokarst lakes in the permafrost zone of Western Siberia based on the geo-simulation approach are considered. The basic principles for the development of a geo-simulation model for the structure of thermokarst lakes fields are outlined. Experimental data on the properties of lake fields obtained on the basis of the integration of high- and medium-resolution satellite images are presented. Data analysis showed that the empirical histogram of the distribution of lakes by size is approximated by the lognormal distribution law by the Pearson criterion with a probability of 0.99. This law of distribution, in contrast to the power law of size distribution of lakes that is commonly used in such studies, also takes into account small lakes, considered as intense sources of methane emission into the atmosphere from thermokarst lakes. An example of modeling the field of thermokarst lakes with a lognormal law of their size-distribution is given.

Key words: remote sensing methods, satellite imagery, geographic information systems, permafrost, Western Siberia, geo-simulation modeling, thermokarst lakes, size-distribution of lakes.

1. Введение

Нынешнее глобальное потепление климата, наиболее ярко проявляющееся в северных широтах планеты, ускоряет деградацию вечной мерзлоты. Вечная мерзлота, являясь хранилищем консервированного углерода в огромных замороженных торфяных болотах Северной Евразии, в условиях еще большего потепления может стать источником выбросов парниковых газов. Это приведет к формированию новых социально-экологических проблем для мирового сообщества. Действительно, углерод в настоящее время находится в связанном состоянии как органическое вещество в слое вечной мерзлоты на северных территориях Евразии и Америки. С потеплением климата повышение температуры приведет к таянию замороженных горных пород и дополнительному высвобождению метана в качестве продукта жизнедеятельности микроорганизмов, перерабатывающих талые органические вещества, что может внести дополнительный ощутимый вклад в потепление климата.

В зоне вечной мерзлоты Западной Сибири была установлена доминирующая роль в накоплении метана малых термокарстовых озер (с площадью менее 0,01–0,05 га) [1]. Однако вклад миллионов таких озер в глобальный парниковый эффект из-за небольшого размера еще не был учтен. Попытки принять их во внимание при оценке общего объема мировых запасов метана в недавно опубликованной статье [2], основанной ввиду отсутствия экспериментальных данных на использовании теоретического степенного закона распределения размеров озер, вызывают большие сомнения, так как степенной закон не подтверждается экспериментальными данными [3]. Разработка мер по предотвращению повышения среднегодовой температуры более чем на 2 градуса к 2050 году в соответствии с решениями Всемирного климатического саммита на высшем уровне (Париж, 2015 г.) требует формирования прогнозов динамики запасов метана в озерах северных территорий на ближайшие десятилетия. Это потребовало разработки методов и инструментов для моделирования динамики термокарстовых озерных полей, что позволило бы внести вклад миллионов малых озер в общее количество запасов метана на общирных территориях Северной Евразии.

Согласно Моисееву и Свирежеву [4], имитационное моделирование – это метод исследования, с помощью которого можно построить приближенную модель исследуемых пространственных объектов. Имитационное моделирование является одним из наиболее важных типов математического моделирования, которые могут быть использованы для построения достаточно эффективной модели полей термокарстовых озер с точностью, достаточной для текущих исследований. Лоу и Кельтон [5] утверждают, что имитационное моделирование используется для построения моделей в тех случаях, когда, во-первых, нет аналитического решения или это решение очень сложно и требует огромной вычислительной мощности, а вовторых, количество экспериментальных данных о моделируемом объекте для статистического метода недостаточно. В этом случае математическая модель разрабатывается с использованием имитационного моделирования.

Различные группы авторов вводили специальные термины для моделирования пространственных объектов. Берлянт и др. [6], Тикунов [7], Кузьмиченок [8], Ковалев [9], Сердюцкая и Яцишин [10], Кулик и Юрофеев [11], Тимонин [12] назвали это математикокартографическим моделированием, Лоусон и Денисон [13], Ван [14], Пох-Чин и др. [15] – пространственным моделированием. Полищук и Токарева [16], Чжао и Мураяма [17] ввели термин «геоимитационное моделирование».

Термины, упомянутые выше, характеризуют моделирование пространственных объектов по данным, анализ которых производится с помощью методов пространственного анализа, реализуемых на основе современных ГИС-систем (геоинформационный анализ). На наш взгляд, наиболее удачным общим определением для изложенных типов моделирования (пространственное, математико-картографическое, геоинформационное, геоимитационное и др.) является определение «геоимитационное моделирование», которое интерпретируется как создание геоимитационной модели и моделирование объектов с пространственной структурой. Пространственный характер и высокая степень сложности полей термокарстовых озер как объектов моделирования показывает существенность использования геоимитационного моделирования. Наиболее важной задачей является разработка геоимитационной модели поля термокарстовых озер, которая понимается как математическая модель, воспроизводящая пространственную структуру полей термокарстовых озер путем имитации формы, размеров и взаиморасположения озер на изучаемой территории, с учетом экспериментально установленых статистических закономерностей их случайного расположения и распределения озер по их размерам. Вопросы разработки такой модели рассматривались в [18–21], в которых использовались экспериментальные данные о свойствах озер в зоне мерзлоты Западной Сибири, полученные по снимкам среднего разрешения Landsat, на которых не видны малые озера. Поэтому для учета малых озер возникает необходимость привлечения снимков высокого разрешения.

В связи с вышеизложенным, основной целью настоящей работы явилось рассмотрение вопросов моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер на основе интеграции снимков среднего и высокого разрешения, обеспечивающих учет озер всех размеров.

2. Экспериментальное исследование статистических свойств полей термокарстовых озер в криолитозоне Западной Сибири

2.1. Краткая характеристика исследуемой территории и использованных снимков

Информационную основу исследования свойств полей термокарстовых озер составляют материалы анализа космических снимков, по которым измеряются площади озер исследуемой территории. По данным статьи [22], образование термокарстовых озер происходит под воздействием ряда факторов, из которых выделяются главные – равнинный характер территории и наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород.

Исследования проводились в границах сплошной, прерывистой и островной криолитозон Западной Сибири методом дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с использованием космоснимков среднего и высокого разрешения, отобранных за сравнительно короткий промежуток времени (2013–2015 гг.). Выбирались снимки, осуществленные в летний сезон (июнь–август), для уменьшения роли сезонных изменений уровня воды в водоемах. Также в летний сезон отсутствует лед на озерах, препятствующий их дешифрированию на космических снимках.

Так как снимки среднего разрешения Landsat (30 м) обеспечили полное покрытие исследуемой территории, для исследований использовалась мозаика этих снимков, позволившая изучать свойства сотен тысяч озер. А исследования по снимкам высокого разрешения Канопус-В (2,1 м) проведены на совокупности тестовых участков, карта-схема расположения которых на территории разных зон многолетней мерзлоты Западной Сибири приведена на рисунке 1.

Выбор тестовых участков осуществлялся на основе общепринятого в подобных исследованиях подхода, в местах концентрации термокарстовых озер, т. е. в местах, где возникают условия для развития и формирования очагов термокарста [22]. На каждом тестовом участке (ТУ) по космоснимкам дешифрировалось от нескольких сотен до нескольких тысяч термокарстовых озер. Общая характеристика тестовых участков и их распределение по зонам мерзлоты даны в таблице 1.

Криолитозона	Количество ТУ	Номера ТУ	Средняя площадь ТУ
Островная	29	1–29	2845
Прерывистая	18	30–47	3125
Сплошная	31	47–78	3109

Таблица 1 – Характеристика тестовых участков

Проблемы моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер в зоне вечной мерзлоты на основе спутниковых снимков



Рисунок 1 – Схема расположения тестовых участков

2.2. Методические особенности дешифрирования озер на снимках

Определение береговых границ термокарстовых озер по спутниковым снимкам Landsat производилось с использованием алгоритма Fmask [23] (Zhu et al., 2015). Данный алгоритм использует ряд параметров, получаемых из спектральных каналов спутниковых снимков Landsat для выделения характеристик отражений различных объектов на земной поверхности в разных спектральных диапазонах Landsat-8. При этом используется набор эмпирических спектральных индексов. Подробно алгоритм рассмотрен в работе [23]. Входными данными являются величины интенсивности отражения от верхних слоёв атмосферы (Top of Atmosphere reflectance) и температуры излучения (brightness temperature), выраженной в виде условных единиц яркости пикселей.

На первом этапе Fmask использует правила комбинирования спектральных каналов, основанные на знании физических свойств облаков, для того чтобы выделить потенциальные «пиксели облаков» и «пиксели безоблачного неба», далее создаются маски вероятных облаков, суши и воды. С использованием данных ближнего инфракрасного канала Landsat генерируется слой потенциальных «тёмных объектов» (dark objects) – теней от облаков. Производится проверка слоя теней на достоверность с применением информации об угле обзора спутника и угле падения солнечных лучей в период съёмки. Итогом обработки становится слой растровых данных в псевдоцветах (false colors), где каждый цвет соответствует определенной единице тематической классификации: водная поверхность, облака, тени от облаков, безоблачная суша, снег/лёд.

Автоматическое дешифрирование с использованием алгоритма Fmask проводилось с выделением всех водных объектов. При этом места, покрытые облаками, исключались из обработки и заменялись соседними (по времени) безоблачными снимками. Отделение термокарстовых озер от прочих водных объектов проводилось в два этапа. На первом этапе была создана маска, включающая водные объекты, не являющиеся озерами (морские заливы и реки). Информация о водных объектах была получена из векторных слоев OpenStreetMap и Государственного водного реестра. На втором этапе производилось отделение озер путем наложения маски на дешифрированные водные объекты, в результате чего был получен слой озер для дальнейшей обработки.

Космические снимки высокого разрешения Канопус-В дешифрировались с использованием метода бинарной классификации. Метод основывается на использовании некоего порогового значения, с помощью которого производится выделение воды. Обрабатываемые панхроматические снимки имеют сильный контраст между водной поверхностью и окружающей растительностью, что позволяет визуально определить пороговые значения для классификации воды. Пороговые значения определялись отдельно для каждого снимка и тестового участка, так как эти значения варьируются из-за различий в параметрах съёмки.

Фрагмент дешифрированного космического снимка, приведенный на Рисунке 2, иллюстрирует характерную особенность полей термокарстовых озер, а именно: наличие на снимках сильно различающихся по размерам озер – от очень больших до малых и очень малых озер.



Рисунок 2 – Фрагмент дешифрированного снимка Landsat-1 (1973 г.) с изображением поля термокарстовых озёр

Обработка, дешифрирование и векторизация данных ДЗЗ проводилась с использованием лицензионного программного обеспечения ArcGIS 10.3.

2.3. Вопросы анализа данных для исследования свойств полей озер

Известно, что на космоснимках среднего разрешения Landsat невозможно дешифрировать малые озера. Следовательно, при использовании данных Landsat эмпирические распределения площадей озер не позволяют учесть вклад термокарстовых озер малых размеров. Известно [1, 24, 25], что концентрация метана в подобных озерах в несколько раз выше его концентрации в озерах площадями более 0,5 га. Поэтому для оценки вклада малых озер необходимо использовать космоснимки высокого пространственного разрешения. Однако такие снимки из-за узкой полосы съемки не покрывают исследуемую территорию полностью, что не дает возможность построить гистограммы распределения озер по площадям, включающие данные о площади крупных водоемов, также накапливающих некоторые объемы метана и углекислого газа. Поэтому большое значение получает задача построения гистограмм распределения площадей озер по результатам дистанционных исследований, в которых учитывались бы озера практически всех размеров – от десятков метров до десятков километров, на всей исследуемой территории. Для того чтобы построить данную гистограмму, в работах [26, 27] было предложено выбирать частичные интервалы гистограммы с неравномерным шагом (по логарифмическому закону), а именно: $20-50 \text{ м}^2$, $50-100 \text{ м}^2$, $100-200 \text{ м}^2$ и т. д. до 200 км^2 , что позволило представить данные о распределении озер по интервалам их размеров достаточно компактно в очень широком диапазоне изменений площадей озер.

Такие гистограммы получаются с использованием методологии [27] объединения данных о площадях озер, по снимкам среднего и высокого разрешения. В результате получается единая (синтезированная) гистограмма распределения площадей озер в очень широком диапазоне их размеров. В соответствии с этой методологией общая (синтезированная) гистограмма распределения озер по площадям получена путем «сшивания» двух исходных гистограмм, первая из которых основана на данных снимков Landsat-8 и представляет большие озера (с размерами от 0,5 до 20000 га). Вторая исходная гистограмма, полученная по данным снимков Канопус-В на 78-ми тестовых участках во всех трех зонах мерзлоты, представляет малые озера (с размерами от 0,005 до 20 га).

Заметим, что использованная в цитированной работе последовательность неравномерных интервалов (по логарифмическому закону) позволяет не только представить обе исходные гистограммы распределения озер достаточно компактно в широком диапазоне изменений площадей озер, но и решать вопросы их объединения (интеграции) в единую (синтезированную) гистограмму распределения озер по размерам.

Для получения исходной гистограммы распределения озер со сравнительно большими размерами с целью наиболее полного учета озер в криолитозоне Западной Сибири была использована мозаика снимков Landsat-8 за период 2013–2014 гг., по которой были определены число и площади озер. Минимальный размер озер, выделяемых на снимках, был ограничен 0,5 га, что составляет на снимках приблизительно 6 пикселей. На основе дешифрирования мозаики космических снимков Landsat-8 средствами ArcGIS 10.3 получены векторные слои термокарстовых озер на территории зоны мерзлоты Западной Сибири, по которым были определены число и площади озер крупнее 0,5 га. Общее количество выявленных озер на территории исследования в период 2013–2014 гг. составило 727,7 тыс. при их суммарной площади около 6 млн га. Полученные таким образом данные о числе и площадях озер на исследуемой территории приведены в [29] в виде табличной зависимости числа озер от площади (т. е. по частичным интервалам площадей).

3. Результаты исследования распределения озер

3.1. Построение синтезированных гистограмм распределения озер во всем диапазоне их размеров

Пространственная структура полей озер определяется распределением озер по размерам и распределением координат местоположения озер на плоскости. Рассмотрим полученные экспериментальные данные о распределении размеров озер на основе интеграции спутниковых снимков разного разрешения. На рисунке 3 приведены гистограммы распределения числа и общей площади озер по результатам проведенных исследований. Полученные раздельно по снимкам высокого и среднего разрешения исходные гистограммы имеют область перекрытия (наложения) шириной в 5 интервалов, расположенных в диапазоне площадей 0,5–20 га.

Как показано в [30], практически приемлемая погрешность дистанционного измерения площади озер по снимкам среднего разрешения (СР) достигается при размерах озер 2 га и более. Поэтому каждая синтезированная гистограмма на рисунке 3 получена на основе «сшивания» двух исходных гистограмм в точках, соответствующих значению площади 2 га и отмеченной на графиках (рисунок 3) вертикальными отрезками прямой линии. Полученные в

результате такого «сшивания» единые (синтезированные) гистограммы распределения числа озер и их общей площади по размерам (рисунки 3-А и 3-Б соответственно) определены в широком диапазоне изменения площадей озер от 50 м² до 20000 га, при этом в интервалах площадей менее 2 га используются данные по снимкам высокого разрешения (ВР), а в интервалах более 2 га – данные по снимкам СР.



Рисунок 3 – Гистограммы распределения числа озер (А) и их общих площадей (В) по размерам с перекрытием в интервале от 5 × 10³ до 10⁶ м², полученных по снимкам среднего разрешения (Landsat-8, черные столбцы) и высокого разрешения (Канопус-В, белые столбцы). Отрезки вертикальных линий на графиках отмечают точку «сшивания» двух частных гистограмм, полученных по снимкам высокого либо среднего разрешения

3.2. Определение вида закона распределения числа озер по размерам

Для построения модели полей озер необходимо знание вида закона распределения озер по разпо размерам. Аппроксимация полученной единой гистограммы распределения озер по размерам (рисунок 3-А), проведенная в [31], показала, что эмпирическое распределение соответствует логнормальному закону. Выполненная с помощью программного пакета Excel проверка соответствия эмпирического (гистограмма) и теоретического (логнормального) распределений с использованием критерия Пирсона показала, что гистограмма распределения площадей озер, полученная в широком диапазоне их размеров, соответствует логнормальному закону с вероятностью 0,99.

Согласно [32], плотность вероятности для логнормального закона распределения площади озер (*s*) определяется уравнением:

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

где μ – математическое ожидание, σ – среднеквадратическое отклонение.

В нашем случае оценки математического ожидания (M) и дисперсии (D) для логнормального распределения площадей озер Западной Сибири получены в [31] из экспериментальных выборочных данных в виде: M = 6,88 и D = 3,42.

Рассмотрим эмпирическое распределение суммарной площади озер по их размерам, представленное в виде гистограммы на рисунке 3-Б. Гистограмма показывает, что основную часть общей площади озер (около 80 %) дают озера с размерами от 2 до 500 га, т. е. озера, характеристики которых могут быть определены по снимкам CP Landsat. Проведенный нами с помощью пакета Excel статистический анализ усеченной синтезированной гистограммы в интервале 2–500 га (Рисунок 3-А) показал, что в этом интервале гистограмма допускает ее аппроксимацию экспоненциальным законом распределения с достаточно высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0.72$). Это подтверждает практическую приемлемость использования разработанной ранее [18] геоимитационной модели для задач моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер.

Эта модель была основана на экспоненциальном распределении озер по размерам в следующем виде:

$$f(s) = \lambda \times e^{-\lambda s} , \qquad (2)$$

где *λ* – параметр закона распределения.

Однопараметрический закон распределения в виде (2) обоснован экспериментальными данными о числе и площадях термокарстовых озер, полученными в [18] по снимкам Landsat на территории мерзлоты Западной Сибири. Значение параметра λ определялось по экспериментальным данным. Согласно [18], математическое ожидание случайной величины, распределенной по экспоненциальному закону, определяется в виде:

$$M(s) = \frac{1}{\lambda}.$$
(3)

Используя в качестве оценки математического ожидания среднее значение площади озера, вычисляемое по экспериментальным данным в виде:

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} S_{i,i} = \overline{1, n},$$
 (4)

найдем, что параметр λ может быть рассчитан по формуле:

$$\lambda = 1/\bar{S} \,. \tag{5}$$

Следовательно, для решения большинства задач моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер, ориентированных на учет озер с размерами более 1–2 га, контролирующих около 80 % общей площади озер, можно использовать более простую геоимитационную модель с экспоненциальным законом распределения озер по размерам. А в задачах, требующих учета малых озер, необходимо использовать логнормальный закон распределения.

3.3. Исследование распределения координат местоположения озер

Анализ экспериментальных данных [18, 19] показал, что эмпирические гистограммы распределения координат центров озер на плоскости соответствуют, согласно критерию χ^2 , закону равномерной плотности с вероятностью 95 %. Проведенный расчет коэффициента корреляции между значениями географических широты и долготы местоположения озер показал отсутствие корреляции между рассматриваемыми величинами, что позволяет сделать вывод о статистической независимости координат местоположения озер на плоскости.

3.4. Исследование изменений формы береговых линий озер

Важным показателем пространственной структуры полей термокарстовых озер является форма береговых границ озер. Дистанционное исследование формы границ термокарстовых озер проводилось в [33] с помощью спутниковых изображений Landsat. Исследования выявили сравнительно небольшую (около 5 % [18]) ошибку в оценке площадей озер при замене реальных озер окружностями. Это и послужило подтверждением выбора окружности в качестве модели озера при геоимитационном моделировании полей термокарстовых озер.

4. Вопросы разработки алгоритма моделирования полей озер и его программной реализации

На основе результатов, изложенных в предыдущем разделе, можно сформулировать следующие фундаментальные принципы, определяющие существенные свойства геоимитационной модели пространственной структуры термокарстового озерного поля:

1. Форма береговой линии озера может быть представлена уравнением окружности с координатами центров x_i, y_i и площадью s_i (*i* – порядковый номер озера).

2. Координаты центров окружностей являются случайными величинами, распределение которых определяется законом равномерной плотности.

3. Площади окружностей являются случайными величинами, распределение которых определяется в зависимости от условий моделирования:

3.1. логнормальным законом, в случаях учета озер всех размеров, включая малые;

3.2. экспоненциальным законом, в случаях, когда можно ограничиться большими озерами (более 1–2 га).

4. Пространственные изменения координат центров окружностей и их площадей статистически независимы.

Разработанная в соответствии с этими принципами геоимитационная модель поля термокарстовых озер представляет собой совокупность случайных окружностей (Рисунок 4), статистические характеристики которых соответствуют вышеприведенным принципам (1–4). На Рисунке 4 представлена геометрическая интерпретация модели термокарстовых озерных полей. Координаты точек, определяющих границы каждого круга, вычисляются по формулам:

$$x_k = R \times \cos\gamma + x,\tag{6}$$

$$y_k = R \times \sin\gamma + \gamma, \tag{7}$$

где *х* и *у* – координаты центра круга;

x_k и *y_k* – координаты *k*-й точки на круге;

- *γ* значение угла между осью *x* и радиусом, направленным от центра круга к *k*-й точке на круге;
- R радиус круга, вычисляемый по формуле $R = \sqrt{s/\pi}$;

s – площадь круга.



Рисунок 4 – Геометрическое представление фрагмента модели термокарстового поля в виде совокупности случайных окружностей

Основными элементами описания модели являются характеристики формы озера, параметры их случайного расположения на плоскости и конкретный вид закона распределения озер по размерам. Свойства модельных полей термокарстовых озер будут в значительной степени зависеть от формы закона распределения озер по размерам (площади).

Реализация алгоритмов моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер, описанных выше, проведена с использованием языка программирования высокого уровня С# [34] в среде разработки Visual Studio [35]. Примененные инструменты разработки являются универсальными средствами реализации современных программных продуктов. С использованием этих средств в нашем случае реализован программный комплекс геоимитационного моделирования полей термокарстовых озер, обобщенная схема которого представлена на рисунке 5. В состав комплекса включены следующие составляющие:

- 1) средства ввода данных, необходимых для моделирования термокарстовых озер;
- 2) модуль генерации псевдослучайных величин, распределенных по нормальному закону в соответствии с уравнением (7);
- 3) модуль генерации псевдослучайных величин, распределенных по логнормальному закону в соответствии с уравнением (1);
- 4) средства вывода результатов моделирования в формате электронных таблиц в виде файлов с расширением *.xlsx и в графическом виде, подобно рисунке 6.



Рисунок 5 – Общая структура программного комплекса геоимитационного моделирования полей термокарстовых озер

Реализованный программный комплекс позволяет получать массивы данных в виде значений площадей термокарстовых озер, распределенных по логнормальному закону (1). Такое распределение площадей позволяет учитывать малые озера размером менее 200 м², потенциально являющиеся интенсивными источниками эмиссии парниковых газов.

Результатом работы модели является смоделированное поле модельных озер, значения площадей которых распределены по логнормальному закону. Для иллюстрации на Рисунке 6 приведен результат моделирования в виде фрагмента смоделированного изображения поля термокарстовых озер. При моделировании этого фрагмента были заданы число модельных озер 3000 и параметры логнормального распределения M = 6,88 и D = 3,42, определенные выше по экспериментальным данным для зоны мерзлоты Западной Сибири.



Рисунок 6 – Результат моделирования поля термокарстовых озёр с логнормальным законом распределения площадей

Заключение

В статье изложен подход к моделированию пространственной структуры полей термокарстовых озер на основе геоимитационной модели. Создание геоимитационной модели полей термокарстовых озер потребовало экспериментального изучения основных свойств этих полей. Из-за недоступности северных территорий экспериментальные исследования термокарстовых озер проводились на основе спутниковых снимков среднего и высокого пространственного разрешения.

Обработка космических снимков, выполненная с использованием стандартных инструментов геоинформационной системы ArcGIS 10.3, была направлена на получение данных о форме береговых границ озер, координатах центров озер, их количестве и площадях. Комплексный анализ этих данных позволил установить существенные свойства пространственной структуры полей термокарстовых озер, которые были использованы в качестве основных принципов создания геоимитационной модели.

Кратко описана процедура моделирования поля термокарстовых озер, где каждое модельное озеро характеризуется тройкой чисел: координатами центра и площадью. Рассмотрены особенности разработки алгоритмов моделирования озерных полей для двух случаев распределения озер по размерам: по логнормальному и экспоненциальному законам. Представлен фрагмент смоделированного поля термокарстовых озер в случае использования логнормального закона распределения озер по размерам.

Литература

1. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia [Text] / O. S. Pokrovsky, L. S. Shirokova, S. N. Kirpotin [et al.] // Biogeosciences. $-2011. - N_{2} 8. - P. 565-583.$

2. Holgerson, M. A. Large contribution to inland water CO2 and CH4 emissions from very small ponds [Text] / M. A. Holgerson, P. A. Raymond // Nature Geoscience Letters. -2016. $-N_{\text{P}} 9. - P. 222-226$.

3. Cael, B. B. The size-distribution of Earth's lakes [Text] / B. B. Cael, D. A. Seekell // Scientific Reports. – 2016. – 29633.

4. Моисеев, Н. Н. Системный анализ динамических процессов биосферы [Текст] / Н. Н. Моисеев, Ю. М. Свирежев // Вестник Академии Наук СССР. – 1979. – № 2. – С. 47–54.

5. Лоу, А. М. Имитационное моделирование [Текст] / А. М. Лоу, В. Д. Кельтон // Санкт-Питербург : Питер, 2004. – 847 с.

6. Берлянт, А. М. Математико-картографическое моделирование в системе «создание – использование карт» [Текст] / А. М. Берлянт, В. Т Жуков, В. С. Тикунов // Географические исследования в Московском университете. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1976. – С. 235–243.

7. Тикунов, В. С. Моделирование в картографии [Текст] : учебник / В. С. Тикунов. – Москва : Изд-во МГУ, 1997. – 405 с.

8. Кузьмиченок, В. А. Математико-картографическое моделирование возможных изменений водных ресурсов и оледенения Кыргызстана при изменении климата [Текст] / В. А. Кузьмиченок // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2003. – № 6. – С. 33–41.

9. Ковалева, Т. М. Математическое моделирование очагов заражения клещевыми зоонозами на территории Алтайского края [Текст] / Т. М. Ковалева // Известия Алтайского государственного университета. – 2008. – № 1. – С. 58–62.

10. Сердюцкая, Л. Ф. Техногенная экология [Текст] / Л. Ф. Сердюцкая, А. В. Яцишин // Математико-картографическое моделирование. – Москва : Либроком, 2009. – 232 с.

11. Кулик, К. Н. Компьютерное математико-картографическое моделирование агролесоландшафтов на основе аэрокосмической информации [Текст] / К. Н. Кулик, В. Г. Юрофеев // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2010. – № 1. – С. 52–54.

12. Тимонин, С. А. Математико-картографическое и геоинформационное моделирование демографических процессов в регионах Российской Федерации [Текст] / С. А. Тимонин // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. – 2010. – № 5. – С. 11–18.

13. Lawson, A. Spatial cluster modeling [Text] / A. Lawson, D. Denison // Boca Raton-London-New-York: CRC Press. – Chapman and Hall. – 2002, – 287 p.

14. Wang, X. Integrating GIS, simulation models and visualization in traffic impact analysis [Text] / X. Wang // Computers, Environment and Urban Systems. – 2005. – № 29. – P. 471–496.

15. Lai, P. Spatial epidemiological approaches in disease mapping and analysis [Text] / P. Lai, F. So, K. Chan // Boca Raton-London-New-York: CRC Press. – Tailor and Francis Group, 2009. – 194 p.

16. Полищук, Ю. М. Геоимитационное моделирование зон атмосферного загрязнения в результате сжигания газа на нефтяных месторождениях [Текст] / Ю. М. Полищук, О. С. То-карева // Информационные системы и технологии. – 2010. – № 2. – С. 39–46.

17. Zhao, Y. Urban dynamics analysis using spatial metrics geosimulation Spatial analysis and modeling in geographical transformation process [Text] / Y. Zhao, Y. Murayama // Dordrecht-Heidelberg-New-York-London: Springer, GeoJournal Library. – 2011. – № 100. – P. 153–168.

18. Полищук, В. Ю. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты [Текст] / В. Ю. Полищук, Ю. М. Полищук. – Ханты-Мансийск : УИП ЮГУ. – 2013. – 129 с.

19. Polishchuk, V. Y. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems [Text] / V. Y. Polishchuk, Y. M. Polishchuk // New York : Nova Science Publishers. – 2014. – № 6. – P. 205– 234.

20. Polishchuk, Y. M. Forecast of thermokarst lakes dynamics in permafrost based on geosimulation modeling and remote sensing data [Text] / Y. M. Polishchuk, V. Y. Polishchuk // Proc. of Conf. "Mathematical and Information Technologies MIT-2016" (Vrnjacka Banja, Serbia – Budva, Montenegro, Aug. 28 – Sept. 5, 2016). – Published on CEUR-Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1839. – P. 393–405.

21. Polishchuk, Y. M. Using geo-simulation for predicting changes in the sizes of thermokarst lakes in northwestern Siberia [Text] / Y. M. Polishchuk, V. Y. Polishchuk // Kriosfera Zemli. – 2016. – Vol. 20, \mathbb{N} 2. – P. 29–36.

22. Математическая морфология ландшафтов криолитозоны [Текст] / А.С. Викторов, Т.В. Орлов, В.П. Капралова [и др.] // Москва : РУДН, 2016. – 232 с.

23. Zhu, Z. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images [Text] / Z. Zhu, S. Wang, C. E. Wood-cock // Remote Sens. Environ. – 2015. – N_{2} 159. – P. 269–277.

24. 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 [Text] / Y. M. Polishchuk, A. N. Bogdanov, I. N. Muratov [et al.] // Environmental Research Letters. -2018. - V. 13. - P. 1-16.

25. Size distribution, surface coverage, water, carbon, and metal storage of thermokarst lakes in the permafrost zone of the Western Siberia lowland [Text] / Y. M. Polishchuk, A. N. Bogdanov, V. Y. Polishchuk [et al.] // Water. – 2017. – V. 9, Issue 3. – P. 1–18.

26. Опыт и результаты дистанционного исследования озёр криолитозоны Западной Сибири по космическим снимкам различного разрешения за 50-летний период [Текст] / Ю. М. Полищук, А. Н. Богданов, Н. А. Брыксина [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 6. – С. 42–55.

27. Полищук, Ю. М. Методические вопросы построения обобщенных гистограмм распределения площадей озер в зоне мерзлоты на основе космических снимков среднего и высокого разрешения [Текст] / Ю. М. Полищук, А. Н. Богданов, И. Н. Муратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 6. – С. 224– 232.

28. Интеграция космических снимков сверхвысокого и среднего разрешения для построения гистограмм распределения площадей термокарстовых озёр в расширенном диапазоне их размеров [Текст] / Ю. М. Полищук, А. Н. Богданов, Н. А. Брыксина [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 38–46.

29. Обобщенное распределение площадей малых озер в криолитозоне Западной Сибири по космическим снимкам высокого разрешения [Текст] / Ю. М. Полищук, А. Н. Богданов, И. Н. Муратов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 10. – С. 13–21.

30. Брыксина, Н. А. Исследование точности дистанционного измерения площадей озер с использованием космических снимков [Текст] / Н. А. Брыксина, Ю. М. Полищук // Геоинформатика. – 2013. – № 1. – С. 62–68.

31. Полищук Ю. М. Распределение площадей озёр криолитозоны в широком диапазоне их размеров по космическим снимкам среднего и высокого разрешения [Текст] / Ю. М. Полищук, А. Н. Богданов, В. Ю. Полищук // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 3. – С. 16–25.

32. Кремер, Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] : учебник для вузов / Н. Ш. Кремер – Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.

33. Полищук, В. Ю. Дистанционное исследование изменчивости формы береговых границ термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири [Текст] / В. Ю. Полищук, Ю. М. Полищук // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 1. – С. 61–64.

34. С Sharp [Электронный ресурс] // Википедия : свободная энциклопедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/C_Sharp.

35. Microsoft Visual Studio [Электронный ресурс] // Википедия : свободная энциклопедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Visual_Studio.