

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА ОСНОВЕ ГЕОИМИТАЦИОННОГО ПОДХОДА И СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

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

**Аннотация.** На основе геоимитационного подхода разработана новая модель пространственной структуры полей термокарстовых озер, учитывающая озера во всем диапазоне их размеров (от 20 м<sup>2</sup> до 200 км<sup>2</sup>) и извилистость их береговых границ. Предложенная модель позволяет учесть и малые озера, которые рассматриваются как интенсивные источники эмиссии метана и углекислого газа в атмосферу из термокарстовых озер. Определена структура модели в виде совокупности плоских фигур со случайным местоположением координат центров озер и случайными площадью и степенью извилистости границ. Установлено, что полученная по данным спутниковых измерений гистограмма распределения степени извилистости может быть принята, согласно критерию Пирсона, соответствующей логнормальному закону с высокой вероятностью. На основе совместного использования спутниковых снимков среднего и высокого пространственного разрешения разработана эмпирическая гистограмма распределения озер по размерам применительно к территории вечной мерзлоты Западной Сибири. Результаты проверки соответствия эмпирической гистограммы теоретическому логнормальному закону показали, что она соответствует логнормальному закону согласно критерию Пирсона на уровне значимости 0,99. Для программной реализации геоимитационной модели предложено в рамках метода статистических испытаний (Монте-Карло) генерировать последовательности четверок псевдослучайных чисел, первая пара которых имитирует случайные координаты центров озер, а вторая пара — случайные степень извилистости и площадь озера. Разработаны алгоритмы генерирования последовательностей псевдослучайных чисел, позволяющие создать программные датчики чисел, отображающих случайные степень извилистости и площадь озер, распределенных по логнормальному закону.

DOI: 10.25587/SVFU.2020.75.78.007

**Ключевые слова:** моделирование, дистанционное зондирование, геоимитационная модель, вечная мерзлота, термокарстовые озера, извилистость береговых границ озер, логнормальный закон распределения, метод Монте-Карло, спутниковые снимки, метан, глобальное потепление.

---

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.

© 2020 Полищук В. Ю., Муратов И. Н., Куприянов М. А., Полищук Ю. М.

## 1. 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  $2^{\circ}$  к 2050 г. 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 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 их 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 ввиду отсутствия экспериментальных данных о распределении малых озер вызывают большие сомнения, поскольку степенной закон не подтверждается экспериментальными данными [3–5]. Это потребовало разработки новых методов и средств моделирования полей термокарстовых озер, которые позволили бы учесть вклад миллионов малых озер в общий объем эмиссии метана на обширных территориях Северной Евразии.

Согласно Н. Н. Моисееву и Ю. М. Свирежеву [6] 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 изменения площадей озер. Для моделирования пространственных объектов в [7, 8] предложен термин «геоимитационное моделирование». Пространственная природа и высокая степень сложности полей термокарстовых озер как объектов моделирования обуславливает необходимость использования в нашей работе геоимитационного моделирования [9, 10].

Важнейшей задачей является разработка геоимитационной модели случайных полей термокарстовых озер, под которой понимается математическая модель, воспроизводящая пространственную структуру полей термокарстовых озер путем моделирования формы, размеров и относительного положения озер на исследуемой территории с учетом экспериментально установленных статистических закономерностей их случайного расположения, формы и распределения озер по размерам. Разработка упрощенной модели была рассмотрена в [11], в которой использовались экспериментальные данные о свойствах озер в

зоне вечной мерзлоты Западной Сибири, полученные со снимков среднего разрешения (30 м) Landsat, на которых, однако, не видны малые озера. Поэтому для учета малых озёр необходимо использовать снимки высокого разрешения. Кроме этого упрощенная модель не учитывала естественную извилистость береговых границ реальных озёр, что и определило в качестве основной цели данной работы рассмотрение вопросов моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озёр на основе учета случайной извилистости формы границ озёр и вида закона распределения озёр по размерам, учитывающего озера всех размеров, включая малые.

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

Информационной основой для экспериментального изучения свойств полей термокарстовых озёр являются данные дистанционного измерения площадей и периметров озёр по спутниковым снимкам исследуемой территории. Исследования проводились на территории всех трех зон вечной мерзлоты (островной, прерывистой и сплошной) в Западной Сибири на основе спутниковых снимков среднего и высокого разрешения. Все снимки были отобраны в довольно короткий период летнего сезона (конец июня — август), чтобы минимизировать влияние сезонных колебаний уровня воды в озерах. В этот период полностью исчезает ледяной покров на озерах, не позволяющий выделять их при дешифрировании снимков.

Создание геоимитационной модели полей термокарстовых озёр требует знания основных свойств этих полей, которые можно получить экспериментально по спутниковым снимкам. Анализ гистограмм распределения координат расположения центров озёр по данным со спутника Landsat показал [11], что эмпирические гистограммы распределения координат центров озёр соответствуют, согласно критерию  $\chi^2$ , закону равномерной плотности с вероятностью 95%, проведено экспериментальное исследование свойств извилистости береговых линий реальных озёр. По данным спутниковых измерений рассчитаны величины показателя формы (степени извилистости границ) озёр по формуле [12]

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

где  $s$  — площадь;  $p$  — периметр озера

Определение величины  $z$  было проведено по данным со снимков Канопус-В на 78 тестовых участках, схема размещения которых на исследуемой территории Западной Сибири представлена в [5]. Установлено, что величина  $z$  изменяется на разных тестовых участках в интервале от 1 до 11–12 (значение 1 соответствует окружности). Средние значения  $z$  в разных зонах мерзлоты принимают следующие значения: в островной зоне 3,5; в прерывистой 3,38 и в сплошной 2,95. Для задач моделирования полей термокарстовых озёр и про-

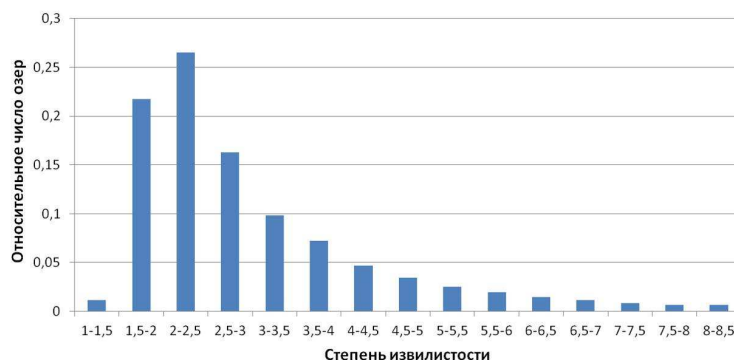


Рис. 1. Гистограмма распределения степени извилистости границ озер по снимкам Канопус-В в зоне мерзлоты Западной Сибири.

гноза эмиссии озерного метана важное значение имеет знание закона распределения степени извилистости береговых границ озер. В настоящее время этот вопрос не исследован и в литературе нет публикаций на эту тему. На рис. 1 приведена эмпирическая гистограмма распределения степени извилистости границ озер, полученная в результате дистанционных исследований в зоне мерзлоты Западной Сибири. Величина  $z$  была рассчитана в соответствии с (1) по результатам дистанционных измерений площадей и периметров озер на 78 ТУ на территории Западной Сибири.

По виду графика гистограммы на рис. 1 можно предполагать, что распределение степени извилистости будет соответствовать теоретическому логнормальному закону. Для обоснования возможности использования логнормального закона распределения степени извилистости границ озер проведена проверка соответствия этого закона эмпирической гистограмме. Результаты проверки этого соответствия по критерию  $\chi^2$  приводятся ниже. Согласно [13] плотность вероятности для логнормального закона распределения степени извилистости ( $z$ ) определяется уравнением

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}z\sigma} \exp\left(-\frac{(\ln z - \ln a)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где  $a$  и  $\sigma$  — параметры логнормального закона распределения.

Оценка параметров логнормального закона распределения извилистости озерных границ Западной Сибири может быть произведена на основе выборочных данных. Используя полученные экспериментальные данные о степени извилистости береговых границ озер, определим параметры логнормального распределения площадей озер криолитозоны Западной Сибири в следующем виде:  $a = 2,65$  и  $\sigma = 0,67$ . Оценка соответствия экспериментально полученного по снимкам высокого пространственного разрешения распределения озер теоретическому логнормальному закону была проведена с помощью стандартной процедуры проверки статистических гипотез о виде закона распределения [13], которая показала, что величина рассчитанного по эмпирическим данным зна-

чения  $\chi^2$  составляет 5,32. Следовательно, можно принять, что эмпирическая гистограмма распределения степени извилистости контуров озер в криолито-зоне Западной Сибири с вероятностью 0,95 соответствует согласно критерию Пирсона логнормальному закону.

Одной из важных для создания геоимитационной модели полей термокарстовых озер является задача построения гистограмм распределения озер по размерам, которые бы учитывали все озера в широком диапазоне размеров — от десятков метров до десятков километров. Вопросы построения такой гистограммы рассмотрены в [14, 15], где предложено выбрать частичные интервалы гистограммы с нерегулярным шагом (согласно логарифмическому закону), а именно, 20–50 м<sup>2</sup>, 50–100 м<sup>2</sup>, 100–200 м<sup>2</sup> и т. д. до 200 км<sup>2</sup>. Это позволило достаточно компактно представить данные о распределении озер по интервалам их размеров в очень широком диапазоне изменений площадей озер.

С использованием разработанной в [14, 16] методики интеграции данных о числе и площадях водоемов, полученных по спутниковым снимкам как среднего, так и высокого разрешения на основе объединения (синтеза) данных о числе и площадях озер, полученных по снимкам различного пространственного разрешения, была построена синтезированная гистограмма распределения озер по площадям в очень широком диапазоне их размеров. В соответствии с этой методикой синтезированная гистограмма распределения озер по площадям была получена путем «сшивания» двух исходных гистограмм, первая из которых основана на данных со снимков среднего разрешения (30 м) Landsat-8 и представляет большие озера (размером от 0,5 до 20 000 га). Вторая исходная гистограмма, полученная по данным со снимков высокого разрешения (2 м) Канопус-В на 78 тестовых участках в зоне вечной мерзлоты, включает малые озера. Синтезированная гистограмма распределения озер по размерам, полученная выше описанным образом по результатам проведенных исследований в зоне мерзлоты Западной Сибири, представлена в [5].

Согласно [13] плотность распределения вероятности для логнормального закона распределения площади озер определяется уравнением

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

где  $s$  — площадь озер,  $\mu$  — математическое ожидание,  $g$  — среднеквадратическое отклонение.

Оценки параметров  $\mu$  и  $g$  теоретического логнормального закона распределения озер по размерам, полученные в [5] из выборочных данных для зоны мерзлоты Западной Сибири, принимают следующие значения: 6,88 и 3,24 для математического ожидания и дисперсии соответственно. Выполненная в [5] проверка соответствия эмпирического и теоретического распределений с использованием критерия Пирсона показала, что величина расчетного  $\chi^2$  равна 0,23 и, следовательно, синтезированная гистограмма распределения площадей озер в широком диапазоне их размеров может быть принята соответствующей логнормальному закону с высокой вероятностью 0,99.

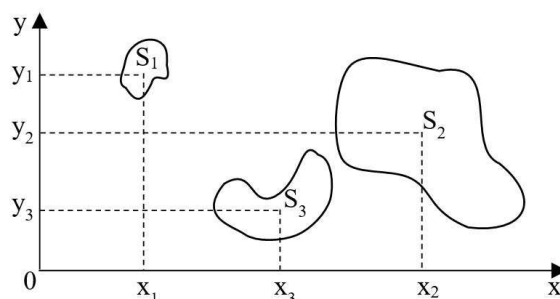


Рис. 2. Модельное представление фрагмента поля термокарстовых озер.

Проведен корреляционный анализ многомерного массива экспериментальных данных об изменениях координат центров, степени извилистости и площадей термокарстовых озер, полученных по спутниковым снимкам. Анализ показал, что коэффициенты взаимной корреляции между всеми указанными выше показателями достаточно малы, что позволило сделать вывод [17] о статистической независимости перечисленных выше показателей полей термокарстовых озер на исследуемой территории мерзлоты Западной Сибири.

### 3. Геоимитационная модель пространственной структуры полей термокарстовых озер

На основании вышеизложенного можно сформулировать следующие фундаментальные принципы, определяющие существенные свойства модели пространственной структуры полей термокарстовых озер.

1. Форма береговых границ озер может быть представлена плоскими фигурами с извилистыми границами, которые описываются следующими характеристиками: координаты центров  $x_i, y_i$ ; степень извилистости  $z_i$ ; площадь  $s_i$  ( $i$  — порядковый номер озера).

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

3. Степень извилистости границ плоских фигур является случайной величиной, распределение которой соответствует логнормальному закону.

4. Площадь плоской фигуры с извилистыми границами — случайная величина, распределение которой определяется логнормальным законом.

5. Пространственные изменения координат центров плоских фигур, степени извилистости границ и их площадей статистически независимы.

Разработанная в соответствии с этими принципами геоимитационная модель полей термокарстовых озер представляет собой совокупность случайных плоских фигур, статистические свойства которых соответствуют вышеуказанным принципам 1–5. Геометрическая интерпретация предложенной новой геоимитационной модели полей термокарстовых озер показана на рис. 2, где представлен фрагмент модели пространственной структуры поля термокарстовых озер. Здесь обозначено:  $s_i$  — площадь  $i$ -го модельного озера;  $i$  — номер озера.

#### 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, 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

$$f(x, y, z, s) \quad (4)$$

где  $x$  и  $y$  — координаты центра плоской фигуры, моделирующей озеро;  $z$  — 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 вышеизложенным экспериментальным данным могут быть приняты статистически независимыми. С учетом этого совместная плотность вероятности (4) может быть представлена в виде

$$f(x, y, z, s) = f(x) \cdot f(y) \cdot f(z) \cdot f(s), \quad (5)$$

где  $f(x)$  и  $f(y)$  — плотности вероятности равномерного распределения;  $f(z)$  и  $f(s)$  — плотности вероятности логнормального закона распределения в виде (2) и (3) соответственно.

С учетом уравнения (5) генерация последовательности случайных чисел, определяющих характеристики расположения центров плоских фигур, осуществляется с использованием генератора псевдослучайных чисел, распределенных 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 со следующим уравнением [18]:

$$s_i = \exp(\mu + g \times r_i), \quad (6)$$

где  $i$  — номер озера,  $r_i$  — псевдослучайное число, распределенное по нормальному закону, рассчитанное как

$$r_i = \sum_{j=1}^{12} q_{ij} - 6, \quad (7)$$

где  $q_{ij}$  — случайная величина, равномерно распределенная на промежутке  $[0, 1]$ .

Рассмотрим особенности алгоритмизации учета извилистости береговых границ озер в моделировании озерных полей. Для создания плоских фигур

с извилистыми границами в модели (рис. 2) на основе эвристического подхода разработана методика формирования модельных объектов, которая позволяет генерировать объекты произвольной формы с заданной 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 [19], что позволяет создать модельный объект со случайной степенью извилистости контура границы  $z$ .
3. Преобразование модельного объекта к его виду с заданной площадью при сохранении исходной величины  $z$ .

Аналогично уравнению (6) для моделирования озер с различной степенью извилистости береговых границ рассчитываются псевдослучайные числа, распределенные по логнормальному закону, в соответствии с уравнением

$$z_i = \exp(a + \sigma r_i),$$

где  $r_i$  определяется уравнением (7),  $i$  — номер озера,  $a$  и  $\sigma$  — параметры логнормального закона распределения степени извилистости границ в виде (2).

Разработанные алгоритмы реализованы на языке программирования Python в виде программного комплекса геоимитационного моделирования с использованием библиотек PyQGIS, NumPy, SciPy. Рассмотрим результаты вычислительного эксперимента с геоимитационной моделью поля термокарстовых озер, проведенного на основе генерации псевдослучайных последовательностей четверок чисел  $x, y, z, s$ . На рис. 3 представлен пример модельного поля, полученного с учетом логнормального распределения как степени извилистости  $z$  в виде (2), так и логнормального распределения площадей озер  $s$  в виде (3). В расчетах использованы приведенные выше значения параметров логнормального распределения площадей озер и степени извилистости границ, определенные по экспериментальным данным для Западной Сибири. Модельное поле озер представлено совокупностью плоских фигур в количестве 358 шт. Отношение общей площади озер в пределах модельного участка к размеру этого участка составило 40%.

## 5. Заключение

В статье изложен подход к моделированию пространственной структуры полей термокарстовых озер на основе геоимитационной модели, представляющей совокупность плоских фигур со случайным местоположением координат центров озер и случайными площадью и степенью извилистости береговых границ озер. Проведены экспериментальные исследования дистанционными методами мало изученных свойств извилистости границ. Установлено, что полученная по данным спутниковых измерений гистограмма распределения степени извилистости может быть принята согласно критерию Пирсона соответствующей логнормальному закону на уровне значимости 0,95.



Рис. 3. Пример геоимитационного моделирования поля термокарстовых озер с учетом логнормального закона распределения их по размерам.

Совместное использование спутниковых снимков среднего и высокого пространственного разрешения позволило разработать синтезированную эмпирическую гистограмму распределения озер по площадям в очень широком диапазоне их размеров, включающем малоизученные озера сравнительно небольших размеров, рассматриваемых как наиболее интенсивные источники эмиссии парниковых газов (особенно метана) из термокарстовых озер в зоне вечной мерзлоты арктических регионов. Проведенная проверка соответствия эмпирической гистограммы распределения озер по размерам теоретическому логнормальному закону показала, что гистограмма согласно критерию Пирсона соответствует логнормальному закону с достаточно высокой вероятностью.

Разработана процедура геоимитационного моделирования поля термокарстовых озер в стратегии метода Монте-Карло, где каждое модельное озеро характеризуется четверкой псевдослучайных чисел, первая пара которых имитирует случайные координаты центра озера, распределенные по закону равномерной плотности, а вторая пара — случайные степень извилистости границ и площадь озера, распределенные по логнормальному закону. Разработаны алгоритмы генерации псевдослучайных чисел, позволившие создать программные датчики псевдослучайных чисел, моделирующие случайную извилистость границ озер и их случайные размеры. Для иллюстрации представлен фрагмент модельного поля термокарстовых озер, рассчитанный с учетом логнормального распределения площадей озер.

Параметры модели получены на основе выборочных данных со спутниковых снимков территории многолетней мерзлоты Западной Сибири. Поэтому

для расширения возможности использования полученных результатов с целью прогнозирования динамики эмиссии метана из термокарстовых озер в зонах мерзлоты необходимы экспериментальные исследования полей термокарстовых озер дистанционными методами в других арктических регионах Северной Евразии.

#### 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. V. 8. P. 565–583.
2. Holgerson M.A., Raymond P.A. Large contribution to inland water CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from very small ponds // *Nature Geoscience Letters*. 2016. V. 9. P. 222–226.
3. Cael B.B., Seekell D.A. The size-distribution of Earth's lakes // *Sci. Rep.* 2016. 29633.
4. 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.
5. Полищук Ю. М., Богданов А. Н., Полищук В. Ю. Распределение площадей озёр криолитозоны в широком диапазоне их размеров по космическим снимкам среднего и высокого разрешения // *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 3. С. 16–25.
6. Моисеев Н. Н., Свирежев Ю. М. Системный анализ динамических процессов биосферы // *Вестн. АН СССР*. 1979. № 2. С. 47–54.
7. 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.
8. 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-Verl., GeoJournal Library*. 2011. N 10. P. 153–167.
9. Polishchuk Y. M., Polishchuk V. Y. Using geo-simulation for predicting changes in the sizes of thermokarst lakes in northwestern Siberia // *Kriosfera Zemli*. 2016. V. 20. P. 29–36.
10. 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. V. 1839. P. 393–405.
11. Polishchuk V. Y., Polishchuk Y. M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost // *New York: Nova Sci. Publ.* 2014. N 6. P. 205–234.
12. Берлянт А.М. Картографический метод исследования. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978.
13. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА. 2004.
14. 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.
15. Полищук Ю. М., Богданов А. Н., Брыксина Н. А., Муратов И. Н., Полищук В. Ю., Куприянов М. А., Байсалямова О. А., Днепровская В. П. 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.
16. Полищук Ю. М., Богданов А. Н., Брыксина Н. А., Полищук В. Ю., Муратов И. Н. 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.

17. Полищук В. Ю., Полищук Ю. М. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зоне мерзлоты. Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013.
18. Дубнер П.Н. Справочник по статистическим распределениям. 2000; URL:<http://algotist.manual.ru/maths/matstat/logNormal/index.php> (дата обращения: 01.07.2018).
19. Han X. A., Ma Y. C., Huang X. L. The cubic trigonometric Bezier curve with two shape parameters // Appl. Math. Let. 2009. V. 22. N 2. P. 226–231.

*Поступила в редакцию 21 сентября 2019 г.*

*После доработки 12 февраля 2020 г.*

*Принята к публикации 17 февраля 2020 г.*

Полищук Владимир Юрьевич

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,

Академический пр., 10/3, Томск 634055;

Томский политехнический университет

пр. Ленина, 30, Томск 634050

[vy\\_polishchuk@hotmail.com](mailto:vy_polishchuk@hotmail.com)

Муратов Ильдар Наильевич

Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий,

ул. Мира, 151, Ханты-Мансийск 628011

[ildarmur@gmail.com](mailto:ildarmur@gmail.com)

Куприянов Матвей Андреевич

Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий ул. Мира,

151, Ханты-Мансийск 628011

[kupr@uriit.ru](mailto:kupr@uriit.ru)

Полищук Юрий Михайлович

Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий

ул. Мира, 151, Ханты-Мансийск 628011

[yupolishchuk@gmail.com](mailto:yupolishchuk@gmail.com)

MODELING THE FIELDS OF THERMOKARST  
LAKES IN THE PERMAFROST  
BASED ON THE GEO-SIMULATION  
APPROACH AND SATELLITE IMAGES

V. Yu. Polishchuk, I. N. Muratov,  
M. A. Kupriyanov, and Yu. M. Polishchuk

**Abstract:** Based on the geo-simulation approach, a new model of the spatial structure of the fields of thermokarst lakes was developed which takes into account the lakes in the full range of their sizes (from 20 m<sup>2</sup> to 200 km<sup>2</sup>) and the tortuosity of their coastal borders. The proposed model also enables us to take into account small lakes, which are considered to be intensive sources of methane and carbon dioxide emissions into the atmosphere from the thermokarst lakes. The structure of the model is determined as a set of flat figures with random locations of the lakes centers and random area and degree of tortuosity of their boundaries. It was established that the histogram of the tortuosity degree distribution obtained from the satellite measurements can be adopted, by the Pearson criterion, as corresponding to the lognormal law with high probability. Based on the use of satellite images of both medium and high spatial resolution, an empirical histogram of the size distribution of the lakes is developed for the permafrost of Western Siberia. The results of checking the correlating of the empirical histogram to the theoretical lognormal law showed the correspondence, according to the Pearson criterion, at the significance level of 0.99. For the software implementation of the geo-simulation model, it is proposed, within the framework of the Monte Carlo procedure, to generate sequences of four pseudorandom numbers, the first pair of which simulates the random coordinates of the centers of lakes and the second pair is for random degrees of tortuosity and areas of the lakes. We developed algorithms for generating sequences of pseudorandom numbers which make it possible to create software number sensors that display random degrees of tortuosity and areas of lakes distributed according to the lognormal law.

DOI: 10.25587/SVFU.2020.75.78.007

**Keywords:** modeling, remote sensing, geo-simulation model, permafrost, thermokarst lakes, tortuosity of the lakes coastal boundaries, lognormal distribution law, Monte Carlo method, satellite imagery, methane, global warming.

REFERENCES

1. Pokrovsky O. S., Shirokova L. S., Kirpotin S. N., Audry S., Viers J., and Dupre B., "Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia," *Biogeosci.*, **8**, 565–583 (2011).
2. Holgerson M. A. and Raymond P. A., "Large contribution to inland water CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from very small ponds," *Nature Geosci. Lett.* **9**, 222–226 (2016).
3. Cael B. B. and Seekell D. A., "The size-distribution of Earth's lakes," *Sci. Rep.*, 29633 (2016).

4. Polishchuk Y. M., Bogdanov A. N., Muratov I. N., Polishchuk V. Y., Lim A., Manasypov R. M., Shirokova L. S., and 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," *Environ. Res. Lett.*, **13**, 1–16 (2018).
5. Polishchuk Yu. M., Bogdanov A. N., and Polishchuk V. Yu., "Distribution of the areas of cryolithozone lakes in a wide range of their sizes according to satellite images of medium and high resolution [in Russian]," *Izv. Tomsk. Politekh. Univ., Geo-Resource Eng.*, **329**, No. 3, 16–25 (2018).
6. Moiseev N. N. and Svirezhev Yu. M., "System analysis of the dynamic processes of the biosphere [in Russian]," *Vestn. Akad. Nauk SSSR*, No. 2, 47–54 (1979).
7. Polishchuk Yu. M. and Tokareva O. S., "Geoimitation modeling of atmospheric pollution zones as a result of gas burning at oil fields [in Russian]," *Inform. Sist. Tekhnol.*, No. 2, 39–46 (2010).
8. Zhao Y. and Murayama Y., "Urban dynamics analysis using spatial metrics geosimulation," in: *Spatial Analysis and Modeling in Geographical Transformation Process*, pp. 153–167, Springer, Dordrecht; Heidelberg; New York; London (2011) (GeoJournal Library; vol. 10).
9. Polishchuk Y. M. and Polishchuk V. Y., "Using geo-simulation for predicting changes in the sizes of thermokarst lakes in northwestern Siberia," *Kriosfera Zemli*, **20**, 29–36 (2016).
10. Polishchuk Y. M. and Polishchuk V. Y., "Forecast of thermokarst lakes dynamics in permafrost based on geo-simulation modeling and remote sensing data," in: *Proc. Conf. Mathematical and Information Technologies (MIT-2016)* (Vrnjacka Banja, Serbia; Budva, Montenegro) **1839**, 393–405 (2017).
11. Polishchuk V. Y. and Polishchuk Y. M., "Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost," in: *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems* (O. Pokrovsky, ed.), ch. 6, pp. 205–234, Nova Sci. Publ., New York (2014).
12. Berlyant A. M., *Cartographic Research Method* [in Russian], Izdat. Mosk. Gos. Univ., Moscow (1978).
13. Kremer N. Sh., *Theory of Probability and Mathematical Statistics* [in Russian], UNITY-DANA, Moscow (2004).
14. Polishchuk Yu. M., Bogdanov A. N., and Muratov I. N., "Methodological issues of constructing generalized histograms of the distribution of lake areas in the permafrost zone based on satellite images of medium and high resolution [in Russian]," *Sovremen. Probl. Distant. Zondir. Zemli iz Kosmosa*, **13**, No. 6, 224–232 (2016).
15. Polishchuk Yu. M., Bogdanov A. N., Bryksina N. A., Muratov I. N., Polishchuk V. Yu., Kupriyanov M. A., Baysalyamova O. A., and Dneprovskaya V. N., "Experience and results of remote research of cryolithozone lakes in Western Siberia from satellite images of various resolutions over a 50-year period [in Russian]," *Sovremen. Probl. Distant. Zondir. Zemli iz Kosmosa*, **14**, No. 6, 42–55 (2017).
16. Polishchuk Yu. M., Bogdanov A. N., Bryksina N. A., Polishchuk V. Yu., and Muratov I. N., "Integration of satellite images of ultra-high and medium resolution for constructing histograms of the distribution of areas of thermokarst lakes in an extended range of their sizes [in Russian]," *Sovremen. Probl. Distant. Zondir. Zemli iz Kosmosa*, **15**, No. 3, 38–46 (2018).
17. Polishchuk V. Yu. and Polishchuk Yu. M., *Geo-Simulation Modeling of Fields of Thermokarst Lakes in the Permafrost Zone* [in Russian], UIP YuGU, Khanty-Mansiysk (2013).
18. Dubner P. N., *Handbook of Statistical Distributions* (2000); <http://algorist.manual.ru/maths/matstat/logNormal/index.php> (accessed: 01.07.2018).
19. Han X. A., Ma Y. C., and Huang X. L., "The cubic trigonometric Bezier curve with two shape

parameters,” Appl. Math. Lett., **22**, No. 2, 226–231 (2009).

*Submitted September 21, 2019*

*Revised February 12, 2020*

*Accepted February 17, 2020*

Vladimir Y. Polishchuk

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems,

10/3 Akademichesky Avenue, Tomsk 634055, Russia;

Tomsk Polytechnic University,

30 Lenin Avenue, Tomsk 634050, Russia

`liquid_metal@mail.ru`

Ildar N. Muratov

Yugra Research Institute of Information Technologies,

151 Mir Street, Khanty-Mansiysk 628011, Russia

`ildarmur@gmail.com`

Matvey A. Kupriyanov

Yugra Research Institute of Information Technologies,

151 Mir Street, Khanty-Mansiysk 628011, Russia

`kupr@spambox.ru`

Yury M. Polishchuk

Yugra Research Institute of Information Technologies,

151 Mir Street, Khanty-Mansiysk 628011, Russia

`yupolishchuk@gmail.com`