

Использование геоимитационного моделирования для прогноза изменения площадей озер Арктики*

Ю. М. Полищук¹, М. А. Куприянов¹, В. Ю. Полищук², Ю. С. Попков³

¹Югорский НИИ информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

³Федеральный исследовательский центр «Информатика и Управление» РАН, Москва, Россия

Аннотация. Статья посвящена важной проблеме разработки информационной технологии моделирования пространственно-временной динамики полей термокарстовых озер как интенсивных источников эмиссии метана в атмосферу арктических территорий. Рассмотрена геоимитационная модель поля термокарстовых озер в виде набора случайных окружностей, свойства которой были определены по экспериментальным данным спутниковых измерений площадей озер на ограниченной территории в зоне мерзлоты Западной Сибири. С использованием спутниковых данных, полученных в последнее время для озер на разных арктических территориях за период 1985-2022 гг., дано экспериментальное обоснование применимости модели на всей территории Российской Арктики. Проведено количественное определение параметра модели, являющегося функцией времени и климатических параметров – среднегодовой температуры и уровня осадков – на разных арктических территориях России. Рассмотрены вопросы генерирования последовательностей псевдослучайных чисел, используемых для моделирования пространственно-временной динамики полей арктических озер с учетом климатических изменений. С помощью компьютерных экспериментов с геоимитационной моделью динамики полей термокарстовых озер получены прогнозы изменения размеров озер в разных арктических регионах на ближайшее десятилетие.

Ключевые слова: термокарстовые озера, геоимитационное моделирование, распределение озер по размерам, космические снимки, климатические изменения, Арктика.

DOI 10.14357/20718632240309

EDN PTSGHP

Введение

Одной из главных проблем современности стало потепление климата, создающее глобальные вызовы мировому сообществу в последние десятилетия. Разработка мер по преодолению негативных последствий повышения температуры земной поверхности требует формирования обоснованных прогнозов изменения выбросов в атмосферу парниковых газов метана

и углекислого газа. Для разработки таких прогнозов необходимы знания о динамике полей термокарстовых озер в вечной мерзлоте, являющихся, по данным [1], интенсивными источниками метана в зонах мерзлоты, и особенно на арктических территориях России, на которых наблюдаются наиболее высокие темпы изменения среднегодовой температуры воздуха, вызывающие ускорение деградации вечной мерзлоты. Из-за труднодоступности этих территорий

* Исследование выполнено по гранту Российского научного фонда, проект № 22-11-20023.

кспериментальные данные о пространственно-временной динамике озер получаются дистанционными методами, что в условиях большого числа пасмурных дней в Арктике приводит к дефициту безоблачных космических снимков, вызывающему большое число пропущенных значений во временных рядах данных о термокарстовых озерах. В связи с этим возникает необходимость применения методов и средств математического моделирования.

В последние годы получил развитие рандомизированный подход [2] к разработке модели эволюции термокарстовых озер, позволяющий учитывать влияние климатических изменений на состояние термокарстовых озер. Важным преимуществом этого подхода является возможность построения моделей в условиях ограниченных объемов экспериментальных данных, что характерно для рассматриваемых задач моделирования динамики термокарстовых озер в зоне мерзлоты. Возможность создавать модели природных объектов без ограничения как на форму контуров береговых границ реальных озер, так и на виды законов распределения характеристик моделируемых объектов делает этот подход достаточно универсальным. На основе этого подхода разработан энтропийно-рандомизированный алгоритм моделирования термокарстовых озер, с использованием которого в [3] получены прогнозные оценки динамики озер на арктических территориях Западной Сибири.

Другим перспективным подходом к разработке моделей динамики полей термокарстовых озер является имитационное моделирование сложных объектов [4; 5], позволяющее учитывать, в отличие от рандомизированного подхода, как геометрические характеристики, так и статистические закономерности распределения характеристик моделируемых объектов. В контексте методологии имитационного моделирования сформировалось одно из новых направлений компьютерного моделирования – геоимитационное моделирование [6], понимаемое как моделирование сложных объектов с пространственно-временной структурой, реализуемое с использованием генераторов псевдослучайных числовых последовательностей в рамках процедуры Монте-Карло и методов и средств статистического анализа и геоинформационных

технологий. В [6] была предложена геоимитационная модель (ГИМ) поля термокарстовых озер в виде набора случайных окружностей, свойства которой учитывают основные статистические характеристики случайных полей реальных термокарстовых озер, определенные по экспериментальным данным спутниковых измерений. С помощью компьютерных экспериментов с геоимитационной моделью поля термокарстовых озер в [6; 7] были получены прогнозные оценки изменения площадей озер с учетом ожидаемых в ближайшие десятилетия изменений температуры воздуха и уровня осадков в зонах мерзлоты Западной Сибири.

Однако полученные прогнозы не могут быть распространены на всю обширную территорию Российской Арктики из-за крайне высокой степени различия природных климатических и геокриологических условий в разных арктических регионах. Более того, представленные в [6; 7] прогнозные оценки эволюции озер Западной Сибири были основаны на спутниковых снимках, полученных за период 1973-2007 гг. За время, прошедшее после 2007 г. были получены новые данные об эволюции озер на неизученных ранее территориях Арктической зоны России от Кольского до Чукотского полуостровов [8-14], которые могут быть использованы для прогнозирования изменений площадей озер на обширных территориях российской Арктики с применением ГИМ. В связи с этим целью работы явилось рассмотрение вопросов использования геоимитационной модели динамики полей озер для получения прогнозных оценок изменений площадей озер на период до 2030 года с применением новых экспериментальных данных о динамике озер на разных территориях российской Арктики.

1. Геоимитационная модель динамики поля термокарстовых озер

Имитационное моделирование, согласно [4; 5], является одним из важных видов математического моделирования, который может быть использован для построения модели полей термокарстовых озер с точностью, достаточной для получения прогнозных оценок изменения пло-

щадей озер. Термокарстовые озера на территории многолетней мерзлоты, испытывающие в условиях потепления климата изменения во времени и в пространстве, могут рассматриваться в виде случайных полей озер с пространственно-временной структурой. Пространственная природа полей термокарстовых озер как объектов моделирования обуславливает необходимость использования в нашей работе геоимитационного подхода [6]. В рамках этого подхода под геоимитационной моделью случайных полей термокарстовых озер 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.

Геоимитационная модель, пригодная для прогнозирования динамики поля термокарстовых озер в зонах многолетней мерзлоты, имеет блочную структуру [5] и состоит из двух блоков. *Первый блок модели* предназначен для отображения пространственной структуры случайных полей озер в виде совокупности случайных окружностей, вероятностные свойства которой соответствуют основным свойствам полей реальных термокарстовых озер, определенным по экспериментальным данным спутниковых измерений на территории мерзлоты Западной Сибири. При этом каждая из окружностей модели имитирует

отдельное термокарстовое озеро. *Второй блок модели* предназначен для отображения динамических свойств полей реальных термокарстовых озер и основан на учете экспериментально обнаруженной дистанционными исследованиями взаимосвязи временных изменений размеров озер с климатическими изменениями.

Приведем более подробное описание *первого блока модели*. На Рис. 1, заимствованном из [6], дано геометрическое представление фрагмента модели пространственной структуры поля термокарстовых озер в виде совокупности случайных окружностей с координатами центров x_i , y_i и площадью s_i (i – номер окружности). Так как объемы эмиссии метана в атмосферу из термокарстовых озер исследуемой территории, согласно [1], определяются суммарной площадью озер на этой территории, наиболее значимым показателем для прогнозной оценки объемов выбросов озерного метана является площадь озер. В [6] исследовано распределение площадей озер по снимкам Landsat, полученных за период 1973-2007 гг. на 29 тестовых участках размером 3 000 га, достаточно равномерно размещенных на обширной территории мерзлоты Западной Сибири. Минимальный размер озер, дешифрируемых по снимкам Landsat (пространственное разрешение 30 м), определяется как величина, равная площади 10 пикселей (из условия надежного выделения озер по снимку на фоне «шумов» изображения), приблизительно соответствует величине 10^4 м^2 .

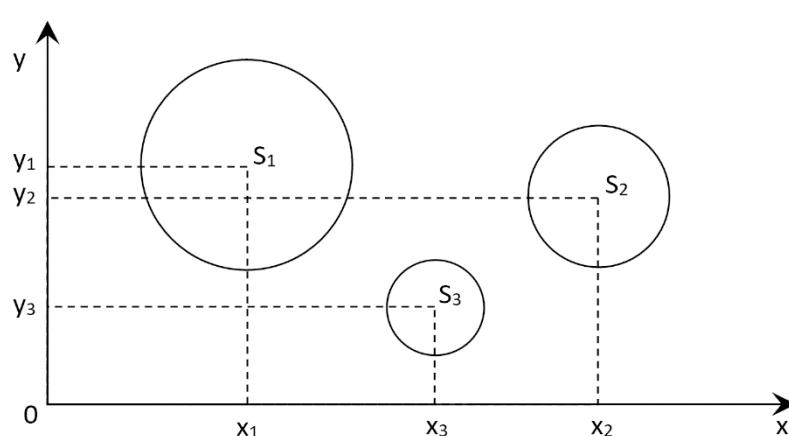


Рис. 1. Геометрическое представление фрагмента модели поля термокарстовых озер в виде совокупности случайных окружностей

С использованием полученных по снимкам Landsat данных о площадях озер Западной Сибири в [6] были построены эмпирические гистограммы распределения озер по размерам в диапазоне площадей озер с размерами более 1 га (10^4 м^2). Проведенный статистический анализ полученных данных показал, что эмпирические гистограммы распределения площадей реальных озер на территории мерзлоты Западной Сибири, согласно критерию χ^2 , соответствуют теоретическому потенциальному закону с вероятностью более 95 %. Поэтому в ГИМ принято, что плотность распределения площадей окружностей в модели подчиняется однопараметрическому показательному закону в виде:

$$f(s) = \lambda \times e^{-\lambda s}, \quad (1)$$

где λ – параметр распределения, определяемый на основе экспериментальных данных о площадях озер по формуле:

$$\lambda = 1/\bar{S}, \quad (2)$$

где \bar{S} – средняя площадь озер на исследуемой территории.

Проведенный в [6] корреляционный анализ совместно измеренных данных о площади и координатах центров озер на территории Западной Сибири показал, что коэффициенты взаимной корреляции между указанными выше показателями достаточно малы (менее 0, 1), что позволило сделать вывод о статистической независимости случайных пространственных изменений площадей s и координат центров озер x и y на исследуемой территории. Как показано в [6], распределение значений каждой из координат центров окружностей, определяется законом равномерной плотности.

С учетом статистической независимости значений площади и координат центров озер при разработке алгоритма моделирования полей термокарстовых озер совместная плотность вероятностей представляется в виде:

$$f(x, y, s) = f(x) \times f(y) \times f(s),$$

где $f(x)$ и $f(y)$ - плотности вероятности равномерного закона распределения координат центров озер; $f(s)$ - плотность вероятности показательного закона распределения площади озер, определяемая соотношением (1).

Следовательно, совокупность окружностей в ГИМ будет представляться последовательностью троек случайных величин (x, y, s) . Для получения модельных полей озер с использованием процедур Монте-Карло необходимо генерировать, во-первых, последовательности случайных чисел x, y с использованием датчика псевдослучайных чисел, распределенных по закону равномерной плотности, и, во-вторых, генерировать последовательности псевдослучайных чисел, распределенных по показательному закону и рассчитываемых по формуле [15]:

$$s_i = -\frac{1}{\lambda} \ln z_i$$

где z_i – числа с равномерным распределением в интервале $(0, 1)$, $i = 1, \dots, n$.

В итоге моделирование полей озер сводится к генерированию последовательностей троек псевдослучайных чисел (x, y, s) , позволяющих формировать с использованием метода Монте-Карло реализации модельных полей озер. Примеры таких реализаций, полученных в компьютерных экспериментах с ГИМ по данным для Западной Сибири, приведены в [6; 7].

Дадим краткие пояснения по второму (динамическому) блоку ГИМ, отвечающему за моделирование временных изменений полей термокарстовых озер. В рамках геомитационного подхода времененная динамика полей термокарстовых озер, формируемая эволюцией размеров, формы и местоположения озер во времени под воздействием климатических изменений, отображается в модели временными изменениями площадей, формы и координат центров озер (рис. 1). Временные изменения статистических свойств поля термокарстовых озер определяются зависимостью параметра модели λ от времени (t) и климатических параметров - температуры и уровня осадков в виде:

$$\lambda = f(T, P, t),$$

где T и P - температура и уровень осадков, являющиеся функциями времени $T(t)$ и $P(t)$.

Определение зависимости параметра λ от времени, температуры и уровня осадков в явном виде осуществлено в [6] на основе многомерного регрессионного анализа временных рядов данных о площадях озер и климатических параметрах, полученных на территории мерзлоты

Западной Сибири за период 1973-2007 гг. Временной ряд данных о площадях озер сформирован на основе результатов дистанционного определения площадей озер по спутниковым снимкам Landsat за указанный период. Все снимки отбирались в довольно короткий период летнего сезона (конец июня - август) для уменьшения влияния сезонных колебаний уровня воды в озерах. Временные ряды данных о температуре и уровне осадков на указанной территории получены методом реанализа из архивов систем ERA-40, ERA-Interim и APHRODITE JMA за тот же период. Результаты проведенного регрессионного анализа указанных данных для Западной Сибири в [6] представляются линейным уравнением множественной регрессии в виде:

$$\lambda = c_0 + c_1 \times x_1 + c_2 \times x_2 + c_3 \times x_3, \quad (3)$$

где c_i – регрессионные коэффициенты ($i = 0, \dots, 3$); x_1 – среднегодовая температура воздуха; x_2 – уровень осадков; x_3 – время.

Так, по данным для Западной Сибири в [6] получены следующие значения коэффициентов регрессии:

$$\begin{aligned} c_0 &= -0,585 \text{ га}^{-1}; c_1 = 0,00062 \text{ га}^{-1}/^{\circ}\text{C}; \\ c_2 &= 0,000014 \text{ га}^{-1}/\text{мм}; c_3 = 0,00032 \text{ га}^{-1}/\text{год} \end{aligned} \quad (4)$$

Соотношение (3), позволяющее рассчитывать временные ряды данных о параметре модели λ по значениям среднегодовой температуры и годовой суммы осадков, было использовано в [6] для получения прогнозных оценок изменения размеров термокарстовых озер на территории мерзлоты Западной Сибири в последующие годы.

Заметим, что модель, представленная в [6; 7], основывалась на результатах дистанционных исследований свойств полей термокарстовых озер на территории Западной Сибири по спутниковым снимкам Landsat, на которых не видны озера с размерами менее 10^4 м^2 (1 га), а использованные для построения ГИМ временные ряды данных о площадях озер относятся к периоду 1973-2007 гг. В период после 2007 г., с применением новых спутниковых систем по снимкам высокого разрешения (1-10 м) было установлено [13] в реальных полях термокарстовых озер в Арктике огромное число малых озер с размерами менее 10^4 м^2 , не учитываемых в ГИМ.

Кроме того, по этим снимкам была выявлена высокая степень извилистости береговых границ озер, которая также не учитывалась в модели. И более чем на порядок по сравнению с территорией исследования в Западной Сибири расширилась площадь исследуемой территории в Арктике. Все это в совокупности потребовало исследования применимости геоимитационной модели для разных арктических территорий, чему посвящен следующий раздел.

2. Экспериментальное обоснование применимости геоимитационной модели динамики озер на других арктических территориях

Высокая степень разнообразия природных условий на обширной территории российской Арктики [16] приводит к существенным отличиям статистических характеристик полей озер на разных арктических территориях, что должно найти отражение в свойствах и параметрах модели. Поэтому целью экспериментальных исследований было подтвердить или опровергнуть возможность применения описанной в предыдущем разделе геоимитационной модели, основанной на учете особенностей природных условий Западной Сибири, для задач моделирования динамики термокарстовых озер на других арктических территориях.

Дистанционные исследования полей термокарстовых озер проведены на достаточно протяженной территории Российской Арктики – от Кольского до Чукотского полуостровов – с большим различием природных геокриологических и климатических условий. В исследованиях использованы спутниковые снимки Landsat-5, 6 и 8 (разрешение 30 м), Sentinel-2 (20 м), Канопус-В (2 м), полученные в период 1985 – 2022 гг. Отбор снимков произведен в сравнительно короткий период летнего сезона (июль - август), что позволило минимизировать влияние сезонных колебаний уровня воды в озерах. На Рис. 2 для иллюстрации представлен фрагмент космического снимка, на котором показаны изображения реальных термокарстовых озер в зоне вечной мерзлоты, демонстрирующие различие форм береговых границ термокарстовых озер. Как видно из Рис. 2, наиболее характерной

формой контура озера является плоская фигура с извилистой границей, отличающейся от окружности, имитирующей отдельное озеро и принятой при разработке описанной выше геомимитационной модели. Ниже обсуждаются результаты исследований степени извилистости береговых линий озер на разных арктических территориях, например, [12], и дана оценка ее влияния на погрешности измерения площади озер по снимкам.

Влияние извилистости береговых линий озер на измерение их площади. Экспериментальное исследование свойств извилистости береговых линий реальных озер проведено с использованием снимков высокого разрешения Канопус-В на разных территориях Российской Арктики [12]. По данным спутниковых измерений рассчитаны величины степени извилистости береговых границ реальных озер по формуле [12]:

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

где s – площадь; P – периметр озера.

Установлено, что величина z изменяется на разных тестовых участках в широком интервале значений от 1 до нескольких десятков (значение «1» соответствует окружности), а ее средние значения на разных территориях находятся в достаточно узком интервале 2,9 – 5,5. В [17] исследовано влияние извилистости береговых границ озер на точность дистанционного измерения площади озер по спутниковым снимкам. Показано, что погрешность измерения площади озер с размерами более 10^4 м^2 по снимкам Landsat в среднем не превышает 4 %, что может рассматриваться как практически приемлемая величина. Следовательно, при моделировании полей термокарстовых озер на всех территориях арктической зоны извилистостью границ можно пренебречь и считать обоснованным выбор окружности для имитации форм отдельных озер в рамках ГИМ.

Оценка вклада малых озер в общую площадь озер на арктической территории. При разработке геомимитационной модели динамики площадей озер были использованы снимки Landsat, т.к. только по этим снимкам к настоящему времени накоплены обширные мировые архивы для различных регионов за достаточно

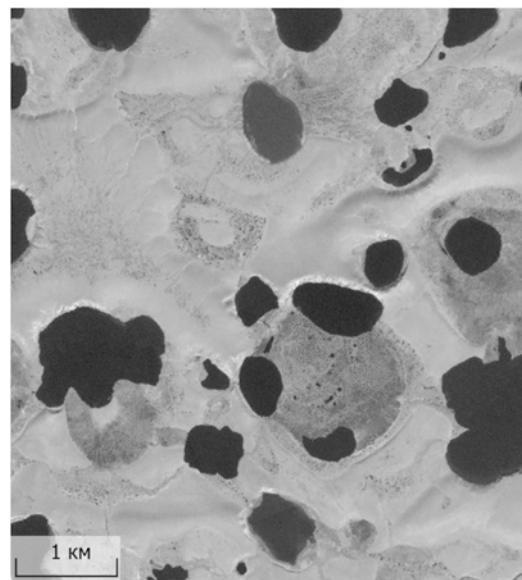


Рис. 2. Фрагмент космического снимка Канопус-В, 30.08.2018 г., север Якутии

длительный период нескольких десятилетий, начиная с 1973 г. С появлением в последние годы новых спутниковых систем стало возможным использовать снимки высокого разрешения, например, Канопус-В (разрешение 2 м), что позволило установить наличие на арктических территориях значительного числа озер с размерами менее 10^4 м^2 , не обнаруживаемых на снимках Landsat. Для оценки вклада огромного числа малых озер (с размерами от десятков до 10^4 м^2) в общую площадь озер на отдельных арктических территориях необходимо исследовать распределение площадей озер по размерам во всем диапазоне их размеров, начиная от $20 - 50 \text{ м}^2$.

С использованием методики объединения данных о площадях озер со снимков среднего и высокого разрешения в [13] по снимкам Sentinel-2 и Канопус-В были получены эмпирические гистограммы распределения площадей озер в нескольких восточных регионах российской Арктики в очень широком диапазоне размеров озер (от 50 до 10^8 м^2). Проведенный нами анализ гистограмм для всех исследованных арктических тундр (от Кольской до Чукотской) показал, что более 93 – 95 % общей площади водного зеркала озер формируется озерами с размерами более 10^4 м^2 , определяемыми по снимкам Landsat. Таким образом, пренебрежимо малый вклад озер с размерами менее 10^4 м^2 в суммарную площадь озер, не превышающий 5 – 7 %, позволяет

при построении эмпирических гистограмм распределения площадей озер на разных арктических территориях использовать совокупности озер с размерами более 10^4 м^2 , определяемыми по снимкам Landsat. Такие гистограммы, как следует из вышеизложенного, согласно критерию χ^2 , с высокой вероятностью соответствуют теоретическому потенциальному закону. Следовательно, при моделировании полей термокарстовых озер на разных территориях Арктики может быть использована рассмотренная выше ГИМ.

Анализ взаимосвязи динамики площадей озер и климатических изменений. Согласно вышеизложенному, второй (динамический) блок ГИМ основан на учете взаимосвязи изменений климата и динамики площадей термокарстовых озер, установленной в [6] путем многомерного регрессионного анализа временных рядов данных о площади озер и климатических параметрах в Западной Сибири за период 1973 – 2007 гг. Для анализа применимости ГИМ для моделирования и прогноза временных изменений полей озер под воздействием климатических изменений на всей территории российской Арктики необходимо провести аналогичный регрессионный анализ временных рядов данных о площадях озер и климатических параметрах, полученных после 2007 г. Для проведения анализа по снимкам Landsat были получены данные на пяти территориях арктической тундры (Кольской, Ямальской, Гыданской, Таймырской и Северо-Якутской) за период 1985 – 2021 гг.

Вопросы получения временных рядов данных о площадях озер рассмотрены на примере

Таймырской тундры в [14]. Заметим, что для получения данных о площадях озер на территории Таймыра всего было использовано 190 безоблачных снимков Landsat, полученных в теплые месяцы (июль-август) в период 1985 – 2021 гг. Обработка космических снимков выполнена с использованием средств геоинформационной системы QGIS 3. По результатам измерения площадей озер определялись средние (за год) значения площадей озер на территории исследования, далее называемые средними площадями озер и обозначаемые \bar{S} . Полученный в результате временной ряд данных о площади озер Таймырской тундры, представленный в табличном виде в [14], приведен для иллюстрации на Рис. 3, а в графическом виде.

Использованные в анализе временные ряды среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков, полученные на территории Таймыра за тот же период исследования по результатам реанализа метеоданных с использованием европейской системы реанализа ERA-5 представлены в виде графиков временного хода среднегодовых значений температуры воздуха (T) и уровня осадков (P) на Рис. 3, б и в. Отметим, что график временного хода температуры на Таймыре (Рис. 3, б), как и аналогичные графики на других территориях, показывает в среднем рост во времени среднегодовой температуры, отображающий эффект потепления климата за период исследования.

Данные о средней площади озер и значениях среднегодовой температуры и годовых сумм осадков за период 1985 – 2021 гг. на всех исследованных территориях были объединены в

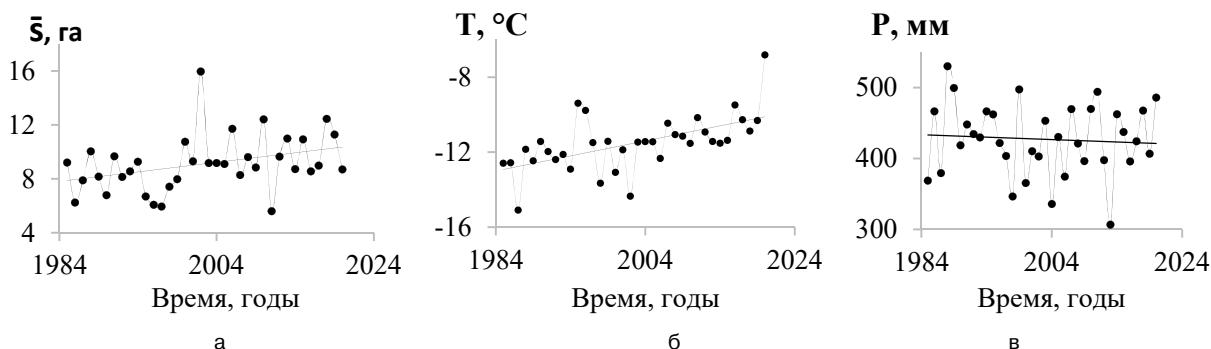


Рис. 3. Графики временного хода среднего значения площади озёр (а), среднегодовой температуры воздуха (б) и годовой суммы осадков (в) на территории Таймырской тундры

3-мерные массивы данных (площадь озер – температура – осадки), зависящих от времени. Результаты многомерного регрессионного анализа 3-мерных массивов данных на каждой территории исследования можно представить уравнением множественной линейной регрессии в виде:

$$\bar{S} = c_0 + c_1 \times x_1 + c_2 \times x_2 + c_3 \times x_3, \quad (5)$$

где c_i - регрессионные коэффициенты ($i = 0, \dots, 3$); x_1 – среднегодовая температура воздуха, x_2 – годовая сумма осадков; x_3 – время (годы).

Например, по результатам анализа многомерного массива данных для Таймырской тундры, проведенного в [14] с помощью средств регрессионного анализа, реализованных на языке Python 3.8, получены с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,443$ следующие значения коэффициентов уравнения регрессии (5):

$$\begin{aligned} c_0 &= -295,935 \text{ га}; c_1 = -0,964 \text{ га/}^\circ\text{C}; \\ c_2 &= 0,005 \text{ га/мм}; c_3 = 0,146 \text{ га/год}. \end{aligned}$$

Вышеизложенное показывает, что взаимосвязь изменений площадей озер и климатических параметров на разных территориях Арктики описывается регрессионным уравнением, положенным в основу построения второго (динамического) блока ГИМ (см. раздел 1). Следовательно, для моделирования временных изменений размеров озер на разных арктических территориях может быть использована геомимитационная модель, величина параметра λ которой будет принимать различные значения на разных территориях. При этом различия в темпах изменения площадей озер на разных арктических территориях будут определяться различиями коэффициентов регрессии, полученных для разных территорий в соответствии с уравнением (3).

3. Примеры прогнозирования изменения площадей озер на арктических территориях

С использованием соотношения (2) для каждой территории были определены временные ряды данных о параметре модели λ . По аналогии с анализом данных о Западной Сибири, результаты которого изложены выше в разделе 1,

был проведен многомерный регрессионный анализ 3-мерных массивов данных (параметр модели λ , температура T , уровень осадков P), полученных за период 1985-2021 гг. для других арктических территорий. На основе этого анализа были определены коэффициенты регрессионного уравнения (3) для каждой арктической территории, что делает возможным получение прогнозных оценок изменения размеров озер на арктических территориях с использованием вышеизложенных процедур геомимитационного моделирования.

С использованием данных о площадях озер, среднегодовой температуре воздуха и годовой сумме осадков, полученных для территорий пяти разных регионов арктической тундры (Кольской, Ямальской, Гыданской, Таймырской и Северо-Якутской) за период 1985-2021 гг., на основе применения геомимитационного моделирования были определены прогнозные оценки изменения площадей термокарстовых озер на указанных арктических территориях. На период прогнозирования величины климатических параметров неизвестны. Поэтому для получения прогнозных оценок площадей озер необходимо было определить прогнозируемые величины среднегодовой температуры и годовой суммы осадков на прогнозный период 2023-2030 гг. В предположении, что за сравнительно короткий период одного десятилетия климатическое и геокриологическое состояние территорий в Арктической зоне не претерпевает существенных изменений, прогнозные значения среднегодовой температуры и годовой суммы осадков для указанного периода прогнозирования были определены путем экстраполяции линейных трендов временных рядов температуры T и осадков P для каждой территории. С использованием полученных таким путем прогнозных значений климатических параметров были рассчитаны в соответствии с (4) значения параметра модели λ для прогнозного периода для каждой из арктических территорий. Далее с использованием датчиков псевдослучайных чисел, формирующих последовательности троек чисел (x, y, s) , величины относительных изменений (%) прогнозируемой площади озер рассчитаны на пяти разных территориях арктической тундры (Табл. 1).

Табл. 1. Изменение прогнозируемой площади озер (%) на разных территориях арктической тундры

годы тундра \	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Кольская	-0,17	-0,33	-0,50	-0,66	-0,83	-0,99	-1,16	-1,33
Ямальская	-0,69	-1,37	-2,06	-2,75	-3,43	-4,12	-4,81	-5,49
Гыданскская	-0,20	-0,40	-0,62	-0,82	-1,02	-1,22	-1,43	-1,63
Таймырская	0,67	1,34	2,01	2,68	3,45	4,11	4,78	5,45
Северо-Якутская	-0,03	-0,05	-0,10	-0,13	-0,17	-0,20	-0,23	-0,27

Согласно результатам прогнозирования динамики величины средней площади озер, представленным в Табл. 1, к концу текущего десятилетия можно ожидать в среднем сокращение размеров озер на большинстве исследованных территорий арктической тундры (кроме Таймырской Арктики, где наблюдается увеличение размеров озер). По данным Табл. 1, в среднем сокращение площадей озер в разных подзонах (исключая Таймыр) составляет величину от 0,27 до 5,49 % к 2030 г. по сравнению с 2022 г. Как видно из Табл. 1, рост площадей озер в Таймырской тундре в указанный период до 2030 г. в среднем ожидается до 5,45 % к уровню 2022 г. Принимая прямую пропорциональность между величиной средней площади озер и объемом накопления озерного метана и углекислого газа, можно ожидать к концу нынешнего десятилетия сокращение объемов эмиссии парниковых газов в атмосферу из термокарстовых озер на большей части арктической тундры России до нескольких процентов. Заметим, что аналогичная тенденция сокращения эмиссии метана на ближайшие десятилетия прогнозируется на арктических территориях, по данным [18], и для выбросов метана из речной сети.

Заключение

Рассматривается геоимитационная модель поля термокарстовых озер в виде набора случайных окружностей, свойства которой учитывают основные статистические характеристики случайных полей реальных термокарстовых озер, определенные по экспериментальным данным спутниковых измерений. Проведенный анализ массивов экспериментальных данных, основанных на дистанционных исследованиях свойств

полей реальных озер на разных территориях, показал применимость геоимитационной модели для исследования и прогноза пространственно-временной динамики озер на всей территории Российской Арктики. Геоимитационное моделирование полей озер осуществляется путем генерации последовательностей псевдослучайных чисел в рамках процедуры Монте-Карло, используемых для моделирования пространственно-временной динамики полей арктических озер с учетом климатических изменений.

С использованием данных о площадях озер, среднегодовой температуре воздуха и годовой сумме осадков, полученных для территорий пяти разных регионов арктической тундры (Кольской, Ямальской, Гыданской, Таймырской и Северо-Якутской) за период 1985-2022 гг., на основе применения геоимитационной модели были определены прогнозные оценки изменения площадей термокарстовых озер на разных арктических территориях. Показано, что в среднем сокращение площадей озер в большинстве арктических регионов России составляет величину от 0,27 до 5,49 % к 2030 г. по сравнению с 2022 г.

Литература

- Holgerson M.A., Raymond P.A. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds. *Nat Geosci.* 2016;9:222–6. DOI: 10.1038/ngeo2654
- Popkov Y.S., Popkov A.Y., Dubnov Y.A. Entropy randomization in Machine Learning. CRC Press, 2023. DOI: 10.1201/9781003306566
- Dubnov Y. A., Popkov A. Y., Polishchuk V. Y. et al. Randomized Machine Learning Algorithms to Forecast the Evolution of Thermokarst Lakes Area in Permafrost Zones // Automation and Remote Control. – 2023. – Vol. 84, No. 1. – P. 56-70. – DOI: 10.1134/s0005117923010034.

4. Моисеев Н.Н., Свирежев Ю.М. Системный анализ динамических процессов биосфера // Вестник Академии Наук СССР. 1979. № 2. С. 47-54.
5. Лоу А., Кельтон В. Имитационное моделирование. Классика Computer Science. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. – 847с.
6. Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Геомимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты. – Ханты-Мансийск : Югорский государственный университет, 2013. – 129 с. – ISBN 978-5-9611-0079-2.
7. Polishchuk V., Polishchuk Y. Modeling and prediction of dynamics of thermokarst lake fields using satellite images // Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems : Editors: Oleg S. Pokrovsky (CNRS, Toulouse, France and Tomsk State University, Russia). – New York : Nova Science Publishers, Inc., 2014. – P. 205-234. – DOI: 10.978-94-007-4569-8.
8. Кравцова В. И., Родионова Т.В. Исследование динамики площади и количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам // Криосфера Земли. – 2016. – Т. 20, № 1. – С.81-89.
9. Викторов А. С., Капралова В. Н., Орлов Т. В. Трапезникова О.Н., Архипова М.В., Березин П.В., Зверев А.В., Панченко Е.Н., Садков С.А. Закономерности распределения размеров термокарстовых озёр // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 474, № 5. – С. 625-627. – DOI: 10.7868/S0869565217050218.
10. Webb E. E., Liljedahl A. K., Cordeiro Ja. A. Permafrost thaw drives surface water decline across lake-rich regions of the Arctic // Nature Climate Change. – 2022. – Vol. 12, No. 9. – P. 841-846. – DOI: 10.1038/s41558-022-01455-w.
11. Cooley S. W., Ryan J. C., Smith L. C. Pitcher L.H., Pavelsky T.M. Arctic-Boreal Lake Dynamics Revealed Using CubeSat Imagery // Geophysical Research Letters. – 2019. – Vol. 46, No. 4. – P. 2111-2120. – DOI: 10.1029/2018GL081584.
12. Полищук Ю. М., Муратов И. Н., Полищук В.Ю. Исследование извилистости береговых границ термокарстовых озёр Западной Сибири по снимкам высокого разрешения "Канопус-В" // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 5. – С. 130-137. – DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-130-137.
13. Муратов И. Н., Байсалямова О. А., Полищук Ю. М. Изучение распределения по размерам термокарстовых озер восточной части Российской Арктики на основе совмещения данных со снимков Sentinel-2 и Канопус-В // Исследование Земли из космоса. – 2023. – № 4. – С. 52-59. – DOI: 10.31857/S0205961423040061.
14. Полищук В. Ю., Куприянов М. А., Полищук Ю. М. Анализ взаимосвязи изменений климата и динамики термокарстовых озёр в арктической зоне Таймыра // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18, № 5. – С. 193-200. – DOI 10.21046/2070-7401-2021-18-5-193-200.
15. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем // М.: Изд-во «Наука», 1968. – 356 с.
16. Callagan T.V., Jonasson S. Arctic ecosystems and environmental change // Phil. Trans. Roy Soc London A., 1995 Vol. 352. – P. 259-276. DOI: 10.1098/rsta.1995.0069.
17. Kupriyanov M.A., Kochergin G.A., Muratov I.N., Polishchuk Y.M. Accuracy Analysis of Remote Measurement of Thermokarst Lakes Parameters for Field Dynamics Modeling Problems // Atlantis Press: Advances of Social Science, Education and Humanities Research. 2020. Vol. 483. P. 237-241. DOI: 10.2991/aisr.k.201029.046.
18. Rocher-Ros G., Stanley E.H., Loken L.C., Casson N.J., Raymond P. A., Liu S., Amatulli G., Sponseller R. A. Global methane emissions from rivers and streams // Nature. – 2023. – Vol. 621, No. 7979. – P. 530-535. – DOI 10.1038/s41586-023-06344-6.

Полищук Юрий Михайлович. Югорский НИИ информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия. Главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук. Область научных интересов: моделирование, геостатистический анализ данных, информационные технологии. E-mail: yupolishchuk@gmail.com.

Куприянов Матвей Андреевич. Югорский НИИ информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия. Главный специалист. Область научных интересов: дистанционное зондирование, информационные технологии. E-mail: kupriyanovma@spambox.ru

Полищук Владимир Юрьевич. Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия. Научный сотрудник, кандидат технических наук. Область научных интересов: информационные технологии, геоинформационные системы, анализ данных. E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Попков Юрий Соломонович. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва, Россия, главный научный сотрудник; Академик РАН, доктор технических наук, профессор; Область научных интересов: энтропийные методы, макросистемы, рандомизированное машинное обучение. E-mail: popkov@isa.ru.

Using Geo-Simulation Modeling to Predict Changes in Arctic Lake Areas

Y. M. Polyschuk^I, M. A. Kupriyanov^I, V. Y. Polishchuk^{II}, Y. S. Popkov^{III}

^IYugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia

^{II}Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

^{III}Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, Moscow, Russia

Abstract. The article is devoted to the important problem of developing information technology for modeling the spatio-temporal dynamics of fields of thermokarst lakes as intense sources of methane emissions into the atmosphere of Arctic territories. A geo-simulation model of a field of thermokarst lakes in the form of a set of random circles is considered, the properties of which were determined from experimental data from satellite measurements of lake areas in the permafrost zone of Western Siberia. Using satellite data recently obtained for lakes in different Arctic territories for the period 1985-2022, an experimental substantiation of the applicability of the model throughout the Russian Arctic is given. A quantitative determination of the model parameter, which is a function of time and climatic parameters - average annual temperature and precipitation level - was carried out in different Arctic territories of Russia. The issues of generating sequences of pseudo-random numbers used to model the spatio-temporal dynamics of Arctic lake fields taking into account climate change are considered. Using computer experiments with a geo-simulation model of the dynamics of fields of thermokarst lakes, forecasts of changes in the size of lakes in different Arctic regions for the next decade were obtained.

Keywords: thermokarst lakes; geo-simulation modeling; size-distribution of lakes; satellite images; climate change; Arctic.

DOI 10.14357/20718632240309

EDN PTSGHP

References

1. Holgerson M.A., Raymond P.A. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds. *Nat Geosci.* 2016;9:222–6. doi: 10.1038/ngeo2654
2. Popkov Y.S., Popkov A.Y., Dubnov Y.A. Entropy randomization in Machine Learning. CRC Press; 2023. 393 p. doi:10.1201/9781003306566.
3. Yu. A. Dubnov, A. Yu. Popkov, V. Yu. Polishchuk. Randomized Machine Learning Algorithms to Forecast the Evolution of Thermokarst Lakes Area in Permafrost Zones. *Automation and Remote Control.* 2023;84(1):56–70. doi:10.1134/s0005117923010034.
4. Moiseev N.N., Svirzhev Ju.M. Sistemnyj analiz dinamicheskikh processov biosfery. *Vestnik Akademii Nauk SSSR.* 1979;2:47-54. (In Russ.).
5. Lou A., Kel'ton V. Imitacionnoe modelirovanie. Klassika Computer Science. SPb.: Piter; Kiev: Izdatel'skaja gruppa BHV. 2004. 847 p. (In Russ.).
6. Polishchuk V. Ju., Polishchuk Y. M. Geoimitationalnoe modelirovanie polej termokarstovyh ozer v zonah merzloty. Jugorskij gosudarstvennyj universitet. 2013. 129 p. (In Russ.).
7. Polishchuk V. Ju., Polishchuk Y.M. Modeling and prediction of dynamics of thermokarst lake fields using satellite images. *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems.* New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014;6:205-234. doi:10.978-94-007-4569-8.
8. Kravcova V. I., Rodionova T. V. Issledovanie dinamiki ploshchadi i kolichestva termokarstovych ozer v razlichnyh rajonah kriolitozony Rossii po kosmicheskim snimкам. *Kriosfera Zemli.* 2016;20(1):81-89. (In Russ.).
9. Viktorov A. S., Kapralova V. N., Orlov T. V. Zakonomernosti raspredelenija razmerov termokarstovych ozor. *Doklady Akademii nauk.* 2017;474(5):625-627. (In Russ.) doi:10.7868/S0869565217050218.
10. Webb E. E., Liljedahl A. K., Cordeiro Ja. A. Permafrost thaw drives surface water decline across lake-rich regions of the Arctic. *Nature Climate Change.* 2022;12(9):841-846. doi:10.1038/s41558-022-01455-w.
11. Cooley S. W., Ryan J. C., Smith L. C. Arctic-Boreal Lake Dynamics Revealed Using CubeSat Imagery. *Geophysical Research Letters.* 2019; 46(4):2111-2120. doi:10.1029/2018GL081584.
12. Polishchuk Y. M., Muratov I. N., Polishchuk V. Y. Issledovanie izvlistosti beregovyh granic termokarstovyh ozor Zapadnoj Sibiri po snimkam vysokogo razreshenija "Kanopus-V". Sovremennye problemy distacionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2019;16(5):130-137. (In Russ.) doi:10.21046/2070-7401-2019-16-5-130-137.

13. Muratov I. N., Bajsaljamova O. A., Polishchuk Y. M. Izuchenie raspredelenija po razmeram termokarstovyh ozer vostochnoj chasti Rossijskoj Arktiki na osnove sovmeshhenija dannyh so snimkov Sentinel-2 i Kanopus-V. Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2023;4:52-59. (In Russ.) doi:10.31857/S0205961423040061.
14. Polishchuk V. Y., Kupriyanov M. A., Polishchuk Y. M. Analiz vzaimosvjazi izmenenij klimata i dinamiki termokarstovyh ozjor v arkticheskoy zone Tajmyra. Sovremennye problemy distacionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021;18(5):193-200. (In Russ.) doi:10.21046/2070-7401-2021-18-5-193-200.
15. Buslenko N.P. Modelirovanie slozhnyh system. Nauka, 1968. 356 p. (In Russ.).
16. Callagan T.V., Jonassson S. Arctic ecosystems and environmental change. Phil. Trans. Roy Soc London A. 1995;352:259-276. doi:10.1098/rsta.1995.0069.
17. Kupriyanov M.A., Kochergin G.A., Muratov I.N., Polishchuk Y.M. Accuracy Analysis of Remote Measurement of Thermokarst Lakes Parameters for Field Dynamics Modeling Problems. Atlantis Press: Advances of Social Science, Education and Humanities Research. 2020;483:237-241. doi:10.2991/aisr.k.201029.046.
18. Rocher-Ros G., Stanley E. H., Loken L. C. Global methane emissions from rivers and streams. Nature. 2023;621(7979):530-535. doi:10.1038/s41586-023-06344-6.

Polyschuk Yuri M. Yugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia. Chief research scientist, doctor of science, professor. Scientific area: data analysis, information technologies. E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Kupriyanov Matvey A. Yugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia. Chief specialist. Scientific area: remote sensing. E-mail: kupriyanovma@spambox.ru

Polishchuk Vladimir Y. Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia. Researcher, candidate of technical sciences. Scientific area: information technologies. E-mail: liquid_metal@mail.ru

Popkov Yuri S. Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Chief research scientist, academician of Russian Academy of Sciences, doctor of science, professor. Scientific area: entropy methods, macrosystems, randomized machine learning. E-mail: popkov@isa.ru