

# Информационно-моделирующая система для исследований динамики климатических и геокриологических процессов на территории многолетней мерзлоты

В.А. Крутиков<sup>1</sup>, В.Ю. Полищук<sup>1</sup>, Ю.М. Полищук<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

634021, г. Томск, пр-т Академический, 10/3

<sup>2</sup>Институт химии нефти СО РАН

634021, г. Томск, пр-т Академический, 4

<sup>3</sup>Югорский государственный университет  
628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16

Поступила в редакцию 12.10.2010 г.

Рассмотрена структура информационно-моделирующей системы, предназначенной для изучения климатических изменений и динамики геокриологических процессов на территории мерзлоты, включающая в качестве основных составляющих базу данных и подсистему имитационного моделирования полей термокарстовых озер. Предложенная геоимитационная модель основана на экспериментально установленных свойствах реальных полей термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири.

*Ключевые слова:* вечная мерзлота, термокарстовые озера, информационно моделирующая система; permafrost, thermokarst lakes, information modeling system.

## Введение

Потепление климата, ставшее одной из наиболее значимых глобальных проблем современности, приводит на северных территориях к росту аварийности на трубопроводах и других сооружениях нефтегазового комплекса [1–3]. Снижение прочности многолетнемерзлых пород, вызываемое ускорением термокарстовых процессов под воздействием потепления, сопровождается ростом экономических и экологических ущербов на предприятиях отечественного нефтегазового комплекса, так как согласно [4] большинство газовых месторождений и значительная часть месторождений нефти в Западной Сибири располагаются в зоне вечной мерзлоты. Разработка мероприятий по снижению ущерба нефтегазодобывающих предприятий требует проведения исследований динамики термокарстовых процессов на территории вечной мерзлоты в условиях глобального потепления климата. Моделирование и прогноз климатических изменений на северных территориях также требуют знания динамики термокарстовых процессов [5, 6].

В связи с этим изучение изменений термокарстовых процессов в зоне многолетней мерзлоты благодаря глобальным климатическим изменениям,

является актуальной проблемой, решение которой вследствие высокой степени заболоченности и труднодоступности территории многолетней мерзлоты проводится с применением данных дистанционного зондирования поверхности Земли. При этом в качестве наиболее пригодных геоморфологических индикаторов изменений термокарстовых процессов используются хорошо дешифрируемые на космических снимках термокарстовые озера [7, 8].

Однако из-за преобладания на северных территориях облачной погоды не удается сформировать совокупность достаточного числа космических снимков, позволяющую проводить дистанционный мониторинг динамики термокарста. Так, по данным [9] за 35-летний период на территории Западной Сибири удается отобрать лишь 3–5 качественных (без облачности) снимков, что явно недостаточно для исследований многолетней динамики термокарстовых озер. В связи с этим экспериментальные исследования динамики термокарста на территории многолетней мерзлоты с использованием дистанционных методов оказываются информационно-дефицитными и поэтому недостаточно эффективными. Повышение эффективности и оперативности этих исследований может быть достигнуто на основе сочетания методов экспериментальных исследований и математического моделирования. При этом математическое моделирование позволяет изучать динамику термокарстовых озер на основе исследо-

\* Владимир Алексеевич Крутиков (krutikov@imces.ru); Владимир Юрьевич Полищук (liquid\_metal@mail.ru); Юрий Михайлович Полищук (yuri@ipc.tsc.ru).

вания изменений их свойств путем проведения компьютерных экспериментов [10] с их моделью, параметры которой могут определяться на основе экспериментальных данных.

Для проведения исследований динамики полей термокарстовых озер в условиях климатических изменений на основе сочетания методов экспериментальных исследований и математического моделирования необходимо создать информационно-моделирующую систему, что и явилось целью настоящей работы.

## 1. Состав информационно-моделирующей системы

Общая методология построения информационно-моделирующих систем (ИМС) рассматривается в [11,12], согласно которой в состав ИМС для исследования климатических изменений и динамики термокарстовых процессов на территории многолетней мерзлоты входят следующие составные части:

пользовательский интерфейс,

база данных,

подсистема имитационного моделирования,

подсистема статистической обработки и анализа экспериментальных данных и результатов моделирования,

подсистема графического отображения результатов моделирования,

подсистема обработки изображений.

*Пользовательский интерфейс* организует взаимодействие пользователя с подсистемой моделирования, базой данных и прикладными модулями.

Одной из наиболее важных составляющих ИМС является *база данных*, предназначенная для накопления и хранения экспериментальных данных об изменениях климатического и геокриологического состояния территорий исследования и результатов моделирования. Накапливаемые в системе климатические данные включают наборы среднемесячных значений температуры воздуха, уровня осадков, глубины снежного покрова и др., полученных на метеостанциях рассматриваемого региона в более чем 30-летний период исследований. Геокриологические данные включают изображения термокарстовых озер, результаты измерения площадей озер, характеристик местоположения озер и др. В рассматриваемой системе площади термокарстовых озер измеряются по космическим снимкам земной поверхности с помощью средств геоинформационных систем. При этом в пределах каждого снимка выделяются тестовые участки, расположенные на различных широтах в разных зонах сплошного, прерывистого и островного распространения мерзлоты на территории Западной Сибири.

Другой важной составляющей ИМС является *подсистема имитационного моделирования*, включающая средства моделирования полей термокарстовых озер и позволяющая изучать динамику термокарстовых озер в условиях воздействия измене-

ний климата. Сложность полей термокарстовых озер как объектов моделирования вызывает необходимость использовать имитационное моделирование как универсальный метод, основанный на замене изучаемого объекта его моделью, которая с достаточной точностью описывает реальный объект и с которой проводятся компьютерные (имитационные) эксперименты с целью получения информации об изменении свойств этого объекта в условиях изменения климата.

Вследствие пространственного характера объекта моделирования далее будут рассматриваться вопросы разработки его геоимитационной модели. Под геоимитационной моделью согласно [10] понимается математическая модель, воспроизводящая пространственную структуру полей термокарстовых озер путем имитации формы, размеров и взаиморасположения озер на изучаемой территории с учетом экспериментально установленных статистических закономерностей их случайного расположения и распределения озер по их размерам.

*Подсистема обработки и анализа экспериментальных данных и результатов моделирования* предназначена для статистической обработки и анализа экспериментальных данных о площадях и характеристиках озер с целью определения их законов распределения и статистических характеристиках термокарстовых озер. Эта же подсистема используется для статического анализа свойств модели поля термокарстовых озер, получаемой с помощью подсистемы моделирования. Источниками экспериментальной информации об объекте моделирования являются космические снимки территории многолетней мерзлоты, на которых выделяются тестовые участки, расположенные на различных широтах в зонах сплошного и прерывистого распространения мерзлоты. В пределах каждого тестового участка выделяются термокарстовые озера, характеристики местоположения и площади которых являются экспериментальными данными о свойствах объекта моделирования.

*Подсистема графического отображения результатов моделирования* предназначена для визуального представления совокупности окружностей со случайными размерами и их случайным расположением на плоскости как модели полей термокарстовых озер. Подсистема реализована в среде Delphi 7.

*Подсистема обработки изображений* предназначена для обработки и анализа космических снимков и модельных изображений полей термокарстовых озер. Подсистема позволяет создавать картографические материалы для последующего использования в геоинформационной системе, в частности осуществлять преобразование графического отображения результатов моделирования в шейп-файлы, доступные для манипулирования программными средствами геоинформационных технологий. В подсистеме используются средства геоинформационных систем ArcGIS 9.2, ENVI 4 и ERDAS Imagine.

## 2. База данных

База данных предназначена для накопления, хранения и поиска климатических данных и результатов экспериментальных исследований термокарстовых изменений. Так как эти данные имеют пространственный характер, в базе данных предусмотрено хранение географических координат (широта и долгота) местоположения метеостанций и информации о местоположении термокарстовых озер и их размерах (площадах водной поверхности), что позволяет обрабатывать и визуализировать эти данные в географических информационных системах (ГИС).

Климатические данные представляют собой результаты метеонаблюдений, проводившихся в последние 3–4 десятилетия на метеостанциях, расположенных на территории исследований. В базе данных (БД) представлены среднеемесячные данные о температуре, осадках, снежном покрове и др. и результаты их осреднения, например среднегодовые значения температуры и годовых сумм осадков, средних значений температуры в теплые сезоны (с мая по сентябрь).

Экспериментальные исследования термокарстовых процессов проводились дистанционным методом на совокупности тестовых участков, расположенных в разных зонах многолетней мерзлоты на территории Западной Сибири. Карта-схема расположения тестовых участков приведена на рис. 1.

На каждом тестовом участке (ТУ) путем дешифрирования космических снимков земной поверхности определялись от нескольких сотен до несколь-

ких тысяч термокарстовых озер, данные о местоположении и размерах которых передаются в БД.

Фрагмент космического снимка Landsat-7 (07.08.1999 г.) территории ТУ-10 с изображением термокарстовых озер приведен в [9].

## 3. Некоторые результаты статистического анализа экспериментальных данных

Результаты статистической обработки и анализа временных рядов климатических и геокриологических изменений получены на основе данных из БД. Исследование временных рядов температуры и осадков показало, что за более чем 30-летний период исследований температура в среднем возрастает почти на всех метеостанциях, а уровень осадков в среднем сокращается. В ходе этих исследований были определены показатели линейных трендов в период с 1973 по 2007 г., изменения которых для разных метеостанций составили:

для температуры – от  $-0,07$  до  $0,09$  °С/год со средним значением  $0,01$  °С/год;

для осадков – от  $-36,71$  до  $13,95$  мм рт. ст./год со средним значением  $-12,51$  мм рт. ст./год.

Анализ временных рядов средних значений площадей термокарстовых озер показал, что в тот же период времени площади термокарстовых озер на разных тестовых участках в среднем сокращаются. Так, коэффициент линейного тренда изменений площади озер на разных ТУ изменяется от  $-0,28$  до  $0,01$  га/год со средним значением  $-0,09$  га/год.

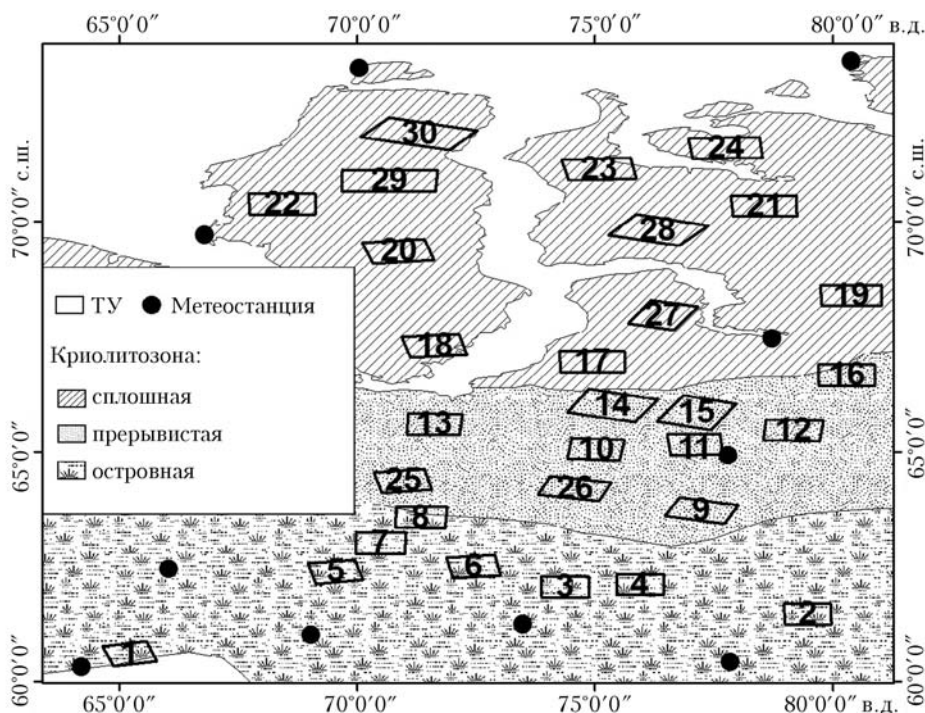


Рис. 1. Карта-схема расположения тестовых участков на территории Западной Сибири

Анализ взаимосвязи климатических и геокриологических изменений проводился путем сопоставления трендов изменения среднегодовых значений температуры и площадей термокарстовых озер. Для иллюстрации на рис. 2 показаны временные ходы средней площади термокарстовых озер на ТУ-10 и среднегодовой температуры воздуха на близкорасположенной к тестовому участку метеостанции.

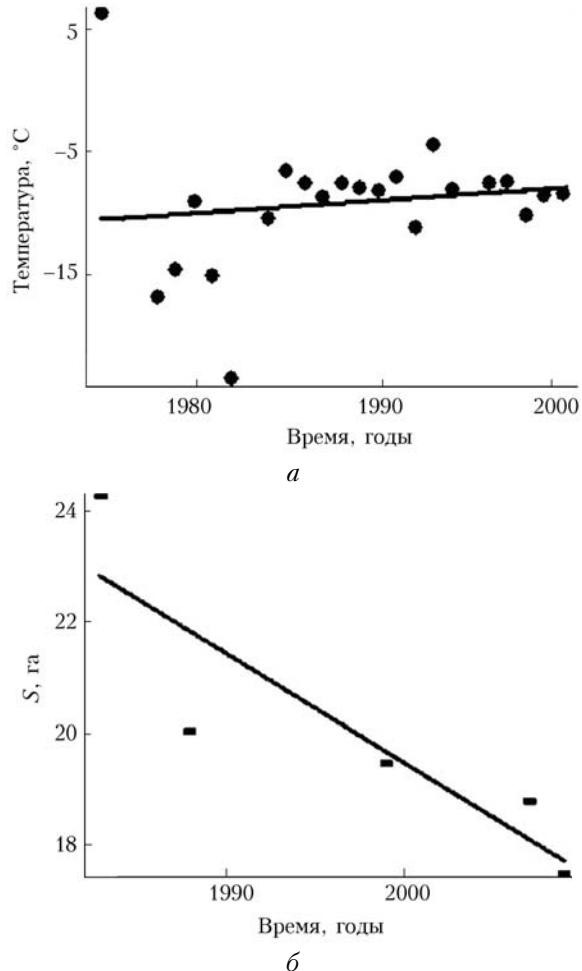


Рис. 2. Зависимости среднегодовой температуры (а) и средней площади термокарстовых озер (б) от времени

Анализ взаимосвязи климатических и геокриологических изменений на остальных тестовых участках исследуемой территории, проведенный в [13], показал, что рост среднегодовых значений температуры во времени сопровождается уменьшением в среднем площади озер. Этот вывод согласуется с результатами исследований американских ученых [14], установивших на основе анализа дистанционных данных значительное сокращение площади термокарстовых озер при существенном увеличении среднегодовой температуры в зонах многолетней мерзлоты в центральной части Аляски за последние 5 десятилетий.

Рассмотрим экспериментальные законы распределения термокарстовых озер по их площадям и распределения координат их местоположения. На

рис. 3 приведены гистограммы распределения значений географических широты и долготы местоположения озер на плоскости (координат центров озер), полученные по дешифрированному снимку территории ТУ-10.

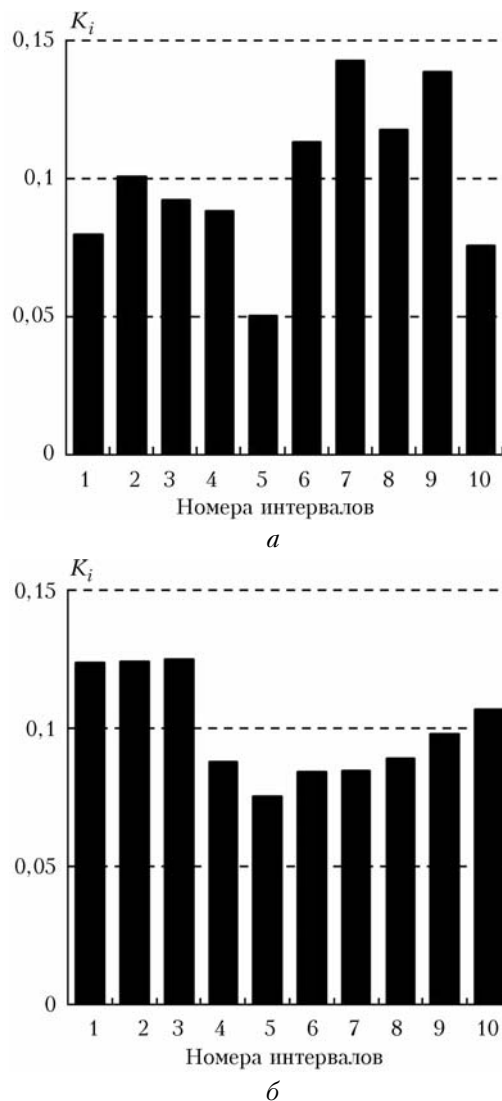


Рис. 3. Гистограммы распределения значений географических широты (а) и долготы (б) местоположения озер на плоскости

На рис. 3 обозначено:  $K_i$  – относительное число озер, попадающих в каждый интервал гистограммы, определяемое по формуле

$$K_i = \frac{n_i}{N},$$

где  $n_i$  – число озер в каждом интервале гистограммы;  $i$  – номер интервала;  $N$  – суммарное количество озер, относящееся к данному году измерения.

Анализ гистограмм показал, что согласно критерию  $\chi^2$  экспериментальные законы распределения координат центров озер на плоскости соответствуют закону равномерной плотности с вероятностью 95%.

Аналогичные выводы могут быть сделаны относительно результатов статистического анализа эмпирических распределений значений координат центров расположения озер для остальных тестовых участков.

Проведено исследование статистического распределения термокарстовых озер по их площадям на основе информации из базы данных. На рис. 4 для иллюстрации приведена гистограмма распределения озер по их площадям, полученная на основе обработки космического снимка Landsat-7 (04.06.2000 г.) территории ТУ-10.

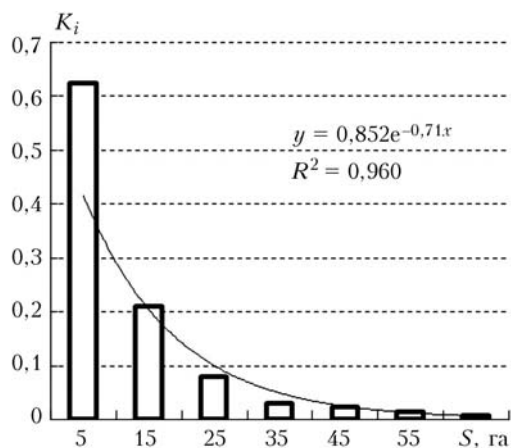


Рис. 4. Гистограмма распределения числа озер по площадям и ее аппроксимация

Сплошная линия отображает аппроксимирующую кривую, определяемую экспоненциальным уравнением

$$y = \alpha \cdot e^{-\beta x}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты уравнения экспоненциальной аппроксимации.

Аналогичная обработка гистограмм распределения озер по площадям, проведенная для других тестовых участков (см. рис. 1), показала, что коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  для разных ТУ принимают в среднем близкие значения в интервалах 0,52–1,11 и 0,50–0,87 соответственно.

#### 4. Математическое моделирование полей термокарстовых озер

На основе приведенных выше результатов экспериментальных исследований полей термокарстовых озер можно описать облик геоимитационной модели этих полей. Модель представляет собой совокупность окружностей, каждая из которых имитирует отдельное термокарстовое озеро. В качестве основных элементов описания модели должны быть определены характеристики, учитывающие форму озер, параметры их случайного расположения на плоскости и случайных размеров озер. Известно [9, 15], что термокарстовые озера, образующиеся в результате протекания земной поверхности из-за вытаивания подземных льдов, имеют, как правило, характерную округлую форму. Поэтому в разрабатываемой модели полей термокарстовых

озер окружность может быть принята в качестве описания формы отдельных озер.

Сформулируем положения, определяющие основные свойства разрабатываемой модели:

1) формы озер моделируются уравнением окружности с координатами центров  $x_i$ ,  $y_i$  и площадью  $S_j$  ( $j$  — номер озера);

2) случайное распределение каждой из координат центров окружностей моделируется законом равномерной плотности;

3) случайное распределение окружностей по их площадям определяется показательным законом распределения.

Ниже приводится алгоритм имитационного моделирования полей термокарстовых озер. Генерирование последовательности случайных чисел, определяющих характеристики местоположения центров окружностей, проводится с использованием датчика псевдослучайных чисел, распределенных по закону равномерной плотности. Необходимо отметить, что для моделирования случайных размеров озер, площади которых распределены по закону, соответствующему уравнению (1), удобно использовать генерирование последовательности случайных чисел, распределенных по показательному закону, применяя формулы [16]:

$$S_j = -\frac{1}{\lambda} \ln Z_j, \quad (2)$$

где  $Z_j$  — числа с равномерным распределением в интервале  $(0,1)$ ;  $\lambda$  — параметр, в котором принято допущение  $\alpha = \beta = \lambda$ , основанное на указанной выше экспериментально установленной близости в среднем значений показателей  $\alpha$  и  $\beta$ .

В соответствии с вышеизложенным алгоритм имитационного моделирования полей термокарстовых озер может быть определен в следующем виде:

шаг 1 — указывается количество формируемых окружностей в модели поля озер;

шаг 2 — генерируется псевдослучайное число, распределенное по равномерному закону;

шаг 3 — с использованием числа, полученного на шаге 2, рассчитывается по формуле (2) псевдослучайная величина площади окружности;

шаг 4 — генерируются два псевдослучайных числа, распределенных по равномерному закону, определяющих местоположение центра окружности на экране;

шаг 5 — с использованием полученного на шаге 3 числа, определяющего площадь окружности, отбражается окружность на экране;

шаг 6 — если количество полученных окружностей меньше количества, заданного на шаге 1, то повторяется алгоритм с шага 2, иначе алгоритм завершен.

Отметим, что программная реализация алгоритма осуществлялась в среде Delphi 7. При этом был использован генератор случайных чисел, распределенных по равномерному закону, встроенный в среду разработки Delphi 7. Результаты моделирования представляются в виде изображений полей термокарстовых озер, которые передаются в ArcGis 9.2 для последующей статистической обработки.

## 5. Результаты моделирования и их анализ

На рис. 5 в качестве примера представлен результат моделирования в виде изображения поля термокарстовых озер.

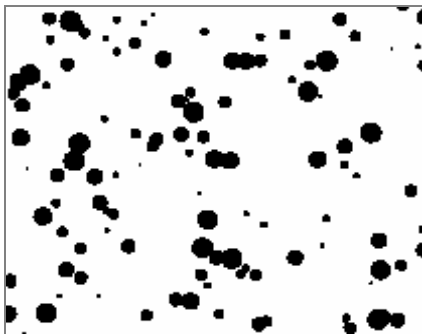


Рис. 5. Результат моделирования поля термокарстовых озер

Для моделирования в качестве экспериментального образца был выбран тестовый участок ТУ-10, для которого аппроксимация эмпирического распределения озер по площадям кривой экспоненциального вида (1), показанная на рис. 4, дает значение коэффициента  $\beta = 0,71$ . Поэтому для моделирования значение параметра  $\lambda$  в уравнении (2) модели было принято равным значению коэффициента  $\beta$ , т.е.  $\lambda = 0,71$ . Проверка адекватности модели проводилась путем сравнения законов распределения термокарстовых озер по эмпирическим и модельным данным с использованием критерия  $\chi^2$ . В качестве эмпирических использовались данные, полученные для реального поля термокарстовых озер на территории ТУ-10. Гистограмма распределения площадей окружностей модельных данных приведена на рис. 6, где также показана ее аппроксимация кривой экспоненциального вида (с высоким уровнем коэффициента детерминации  $R^2$ ).

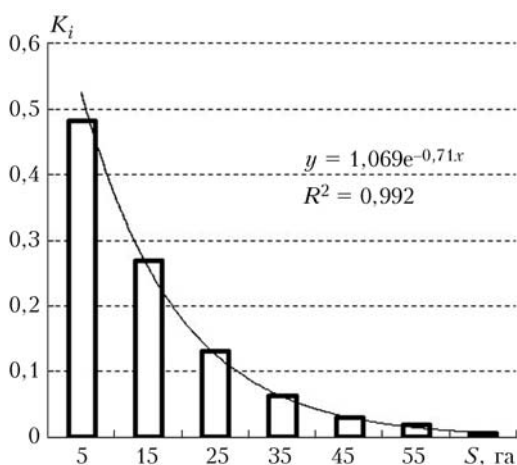


Рис. 6. Гистограмма модельного распределения числа озер по площадям и ее аппроксимация

В результате проверки соответствия модельного и экспериментального законов распределения

озер для ТУ-10 по критерию Пирсона показано, что их соответствие выполняется с вероятностью не менее 70%, что подтверждает адекватность разработанной модели.

### Заключение

Ожидается, что глобальное потепление значительно ощутимее в ближайшие годы будет проявляться в высоких широтах [17]. Более того, именно болотные ландшафты в зоне распространения многолетнемерзлых пород являются наиболее чувствительными к температурным изменениям в силу таяния вечной мерзлоты [18]. С использованием космических снимков на изучаемой территории отечественными и зарубежными учеными выявлены существенные изменения площадей термокарстовых озер, рассматриваемых в качестве удобных геоэкологических индикаторов изменения многолетней мерзлоты в дистанционных исследованиях динамики термокарста. В связи с преобладанием облачности на северных территориях и возникающим дефицитом экспериментальных данных показана необходимость сочетания методов дистанционного исследования термокарста и математического моделирования. Предложена структура информационно-моделирующей системы, ориентированной на интеграцию информации в базе данных и в математической модели. В связи с пространственным характером геоэкологических данных разработана геоимитационная модель поля термокарстовых озер, параметры которой определяются из экспериментальных данных на основе космических снимков. Проведенное сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными путем сопоставления законов распределения по критерию  $\chi^2$  подтвердило адекватность модели.

Разработанная информационно-моделирующая система может быть использована для решения задач мониторинга динамики климатических и геоэкологических процессов на территории многолетней мерзлоты, в задачах прогноза климатических изменений на северных территориях, для разработки мероприятий по снижению риска аварийности на трубопроводах и других объектах нефтегазового комплекса в условиях глобального потепления климата.

Исследования выполняются в рамках проекта № 4.10 «Комплексный мониторинг современных климатических и экосистемных изменений в Сибири» программы фундаментальных исследований Президиума РАН и поддержаны грантом РФФИ (проект № 08-05-92496-НЦНИЛ\_а «Динамика термокарстовых озер криолитозоны Западной Сибири как индикатор климатических изменений по данным космического и наземного мониторинга»).

1. *Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов* / Под ред. Е.С. Мельникова и С.Е. Гречищева. М.: ГЕОС, 2002. 402 с.
2. *Анисимов О., Лавров С.* Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК РФ // Технологии ТЭК. 2004. № 3. С. 78–83.

3. *Samsonov R., Lesnykh V., Polishchuk Yu., Bryksina N.* The climate change impact on thermokarst in West-Siberian territory and geological risks in gas industry / Proc. 14th annual conference of TIEMS (June 5–8, 2007, Split, Croatia). Split: TIEMS, 2007. P. 212–216.
4. *Полищук Ю.М., Яценко И.Г.* Сравнительный анализ химического состава нефтей России на территории вечной мерзлоты и вне ее // Криосфера Земли. 2007. Т. 11, № 1. С. 45–51.
5. *Мачульская Е.Е., Лыкосов В.Н.* Моделирование термодинамической реакции вечной мерзлоты на сезонные и межгодовые вариации атмосферных параметров // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана, 2002. Т. 38. С. 20–33.
6. *Кабанов В.М., Лыкосов В.Н.* Мониторинг и моделирование природно-климатических изменений в Сибири // Оптика атмосф. и океана, 2006. Т. 19, № 9. С. 753–765.
7. *Мельников Е.С., Вейсман Л.И., Крицук Л.Н.* Ландшафтные индикаторы инженерно-геокриологических условий севера Западной Сибири и их дешифровочные признаки. М.: Недра, 1974. 132 с.
8. *Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D.* Disappearing Arctic Lakes // Science. 2005. V. 308, N 3. P. 14.
9. *Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М.* Изучение изменений термокарстовых озер в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 4. С. 88–96.
10. *Полищук Ю.М.* Имитационно-лингвистическое моделирование систем с природными компонентами. Новосибирск: Наука, 1992. 292 с.
11. *Крутиков В.А., Полищук Ю.М.* Геоинформационное обеспечение мониторинга окружающей среды и климата // Оптика атмосф. и океана, 2002. Т. 15, № 1. С. 12–20.
12. *Полищук Ю.М., Силич В.А., Татарников В.А., Ходашинский И.А., Ципилева Т.А.* Региональные экологические информационно-моделирующие системы. Новосибирск: Наука, 1993. 133 с.
13. *Полищук В.Ю., Брыксина Н.А., Днепровская В.П., Полищук Ю.М.* Анализ взаимосвязи климатических и геокриологических изменений на территории вечной мерзлоты Западной Сибири // Восьмое Сибирское совещание по климатологическому мониторингу: Материалы Российской конференции, Томск, 8–10 октября 2009 г. Томск: Аграф-Пресс, 2009. С. 34–36.
14. *Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D.* Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. G04002, doi:10.1029/2005JG000150.
15. *Днепровская В., Полищук Ю.* Исследование геокриологических изменений термокарста в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири // Oil&Gas Journal. Russia, 2008. № 1–2. С. 94–98.
16. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968. 356 с.
17. *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствий на территории Российской Федерации // Т. 1. Изменения климата. Т. 2. Последствия изменений климата. М.: Росгидромет, 2008. С. 227, 288.*
18. *Kirpotin S., Polishchuk Yu., Bryksina N.* Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting // Int. J. Environ. Studies. 2009. V. 66, N 4. P. 423–431.

*V.A. Krutikov, V.Yu. Polishchuk, Yu.M. Polishchuk.* **Information-modeling system for studies of dynamics of climatic and thermokarst processes at permafrost areas.**

The structure of information modeling system, intended for research of climatic changes and dynamics of thermokarst processes at the permafrost territory was considered. It includes database and subsystem of modeling the thermokarst lake fields. Proposed geosimulation model is based on experimentally obtained regularities of changes of real thermokarst lake field properties at the permafrost territory of Western Siberia.