ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ИНСТИТУТ МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИХ И  
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ СО РАН

*На правах рукописи*



ПОЛИЩУК ВЛАДИМИР ЮРЬЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ  
ТЕРМОКАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ  
МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

Специальность 05 ЛЗЛ 8 - Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор Крутиков В. А.

Барнаул - 2012

**СОДЕРЖАНИЕ**

[**ВВЕДЕНИЕ 4**](#bookmark2)

[**ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ 13**](#bookmark4)

1. Общая характеристика полей термокарстовых озер как объекта

исследования 13

1. Анализ современного состояния методов и средств дистанционных

исследований 21

1. Свойства полей термокарстовых озер по данным дистанционных

исследований 33

1. Анализ опыта математического моделирования пространственных

объектов 38

1. [Постановка задач диссертационных исследований 47](#bookmark12)
2. [Основные результаты главы 1 48](#bookmark14)

[**ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР НА ТЕРРИТОРИИ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ 49**](#bookmark17)

1. [Объекты и методики 49](#bookmark18)
2. Экспериментальное исследование статистических свойств

пространственного распределения параметров местоположения термокарстовых озёр 53

1. Экспериментальное исследованние законов распределения

термокарстовых озер по их площадям по данным ДЗЗ 54

1. Дистанционное изучение формы береговых границ термокарстовых

озёр 58

1. Анализ климатических изменений на территории мерзлоты Западной

Сибири по данным метеостанций 63

1. Исследование климатических изменений на территории мерзлоты на

основе данных реанализа 68

1. Исследование взаимосвязи изменений свойств термокарстовых озёр и

климатических параметров с использованием многомерного регрессионного анализа 77

1. [Основные результаты главы 2 87](#bookmark35)

[**ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И АЛГОРИТМОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР 89**](#bookmark37)

1. [Основные свойства математической модели полей термокарстовых озер 89](#bookmark38)
2. Алгоритм численного моделирования пространственной структуры

полей термокарстовых озер 93

1. Алгоритм численного моделирования пространственно-временной

структуры полей термокарстовых озёр 94

1. Учет температурной зависимости параметров модели в алгоритме

[численного моделирования полей термокарстовых озер 96](#bookmark53)

1. [Основные результаты главы 3 97](#bookmark45)

[**ГЛАВА 4. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИМИТАЦИОННОГО**](#bookmark48)[**МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЕГО ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В**](#bookmark48)

1. Подсистема имитационного моделирования полей термокарстовых озер 100

[**ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПОЛЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР 98**](#bookmark48)

[4.1 Описание структуры программного комплекса 98](#bookmark49)

1. База данных о характеристиках полей термокарстовых озёр в зоне

многолетней мерзлоты западной сибири 105

1. Исследование адекватности модели полей термокарстовых озер с

использованием компьютерных экспериментов 109

1. [моделирование динамики полей термокарстовых озер 112](#bookmark57)
2. Прогнозирование пространственно-временных изменений полей

термокарстовых озер 119

1. Анализ изменения температуры на территории многолетней

мерзлоты Западной Сибири 119

1. Прогнозирование динамики полей термокарстовых озер до 2030

года по данным реанализа ERA-40 и ERA-INTERIM 121

1. Прогнозирование динамики полей термокарстовых по данным

системы реанализа ERA-INTERIM до 2050 года 129

1. [Основные результаты главы 4 130](#bookmark61)

[**ЗАКЛЮЧЕНИЕ 132**](#bookmark63)

[**ЛИТЕРАТУРА 134**](#bookmark65)

Приложение А. Среднелетние, среднезимние и среднегодовые значения температуры воздуха и годовая сумма осадков за тридцатилетний период

151

[Приложение Б. Принятые сокращения 152](#bookmark68)

Приложение В. Коллекция снимков Landsat разных тестовых участков ..153 Приложение Г. Свидетельства об официальной регистрации программ и

базы данных 154

Приложение Д. Акты и справка об использовании и внедрении результатов диссертационных исследований 155

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведем перечень основных результатов диссертационного исследования:

1. Исследование на основе космических снимков статистических свойств извилистости береговых границ термокарстовых озер показало, что случайные отклонения береговых границ озер от окружностей невелики и их среднеквадратические отклонения в разных зонах мерзлоты не превышают 5%. Следовательно, при моделировании полей термокарстовых озер береговые границы термокарстовых озер могут быть аппроксимированы окружностью.
2. Исследованы статистические свойства случайных полей термокарстовых озер на основе данных дистанционного зондирования Земли. Показано, что распределение центров озер удовлетворяет закону равномерной плотности, распределение термокарстовых озер по их площадям удовлетворяет показательному закону в виде (2.3.1). Показано также, что как изменения координат центров озер, так и изменения площадей озер и координат их центров статистически независимы.
3. С использованием данных о климатических изменениях использованы климатические показатели, полученные методом реанализа, исследованы взаимосвязи термокарстовых и климатических изменений. В результате установлено, что увеличение среднегодовой температуры воздуха сопровождается в среднем сокращением площади озёр. На основе многомерного регрессионного анализа данных об изменениях площадей озер и климатических показателей найдено уравнение множественной регрессии, связывающее параметр распределения числа озер по их площадям со среднегодовой температурой и годовым уровнем осадков. Указанные взаимосвязи учтены при разработке алгоритма численного моделирования полей термокарстовых озер.
4. Разработана математическая модель полей термокарстовых озер в виде совокупности случайных окружностей. Случайное распределение каждой из координат центров окружностей определяется законом равномерной плотности, а случайное распределение числа окружностей по их площадям определяется показательным законом распределения, параметр которого определяется по экспериментальным данным.
5. Разработан впервые алгоритм численного моделирования полей термокарстовых озер, на основе которого создана подсистема генерирования псевдослучайных числовых последовательностей для моделирования динамики полей термокарстовых озер. Разработан комплекс программ имитационного моделирования, в состав которого входят следующие основные компоненты: подсистема моделирования полей термокарстовых озер, подсистема отображения результатов моделирования, подсистема формирования массивов данных и база данных. Программа моделирования, программа формирования массивов данных и база данных зарегистрированы в Роспатенте (свидетельство №2011614293 от 31 мая 2011 г., свидетельство №2010614377 от 6 июля 2010 г. и свидетельство № 2010620330 от 17 июня 2010 г. соответственно).
6. Установлено, что при сравнении массивов экспериментальных и модельных площадей озер рассчитанное значение критерия Стьюдента не превышает табличного значения при доверительной вероятности 95%, что дает основания принять заключения о том, что разработанный программный комплекс генерирует модельные площади адекватные экспериментальным данным.
7. Для иллюстрации применения результатов диссертации проведено

прогнозирование временных рядов средних значений площадей

термокарстовых озер на исследованной территории многолетней мерзлоты в условиях потепления климата, для чего сформированы сценарии модельных экспериментов для прогнозирования динамики термокарста на период до 2030 и до 2050 годов. В результате проведения модельных исследований показано, что если в течение ближайших десятилетий тенденции роста среднегодовой температуры воздуха на территории многолетней мерзлоты будут сохраняться, то следует ожидать сокращение площадей

термокарстовых озер по сравнению с 2010 годом в среднем на 9,6% к 2030 году и на 16,4% к 2050 году.