

24-5741

пермский  
политех

www.pstu.ru

А.В. Катаев

# Цифровое моделирование топографических поверхностей

24-05741



Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»

**А. В. Катаев**

**ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

*Монография*

Издательство  
Пермского национального исследовательского  
политехнического университета  
2024

УДК 528.932: 004: 94  
К29

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор, заведующий  
кафедрой маркшейдерского дела *А. В. Жабко*  
(Уральский государственный горный университет);  
канд. техн. наук, доцент *В. Б. Замотин*  
(Центр экспертизы «Недра Урала»)

**Катаев, А. В.**

К29

Цифровое моделирование топографических поверхностей :  
монография / А. В. Катаев; ФГАОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический университет». –  
Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2024. – 383 с.

ISBN 978-5-398-03183-6

Съёмка земной поверхности производится густой сетью пикетов и с требуемой точностью, а особенности распространения кровли и почвы пластов полезных ископаемых исследуются на основе редкой сети скважин и проб, положение которых определено с погрешностями. Следовательно, и для построения поверхностей должны использоваться разные технологии. В монографии излагается теоретический материал по методам восстановления таких поверхностей с использованием цифровых технологий. Приводятся сведения по статистике, случайным функциям и геостатистике, необходимые для восстановления геопространственных полей. Предлагается использовать геоморфометрический анализ кровли (почвы) пластов, позволяющий установить пути миграции жидкостей и газов.

Приведённые в монографии сведения могут быть полезными студентам специальностей «Прикладная геодезия» по дисциплине «Математическое моделирование геопространственных данных», «ГИС и технологии» и для студентов специальности «Горное дело» специализации «Маркшейдерское дело» в дисциплинах «Решение горно-геометрических задач на базе ГИС», «Геометрия недр», «ГИС и технологии». Может использоваться студентами указанных специальностей в процессе выполнения курсовых работ дисциплинам «Математическое моделирование геопространственных данных», «Решение горно-геометрических задач на базе ГИС», «Геометрия недр» и выпускных квалификационных работ.

УДК 528.932: 004: 94

ISBN 978-5-398-03183-6

© ПНИПУ, 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕЛЬЕФЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И РУДНЫХ ТЕЛ.....	11
1.1. Геопространственная информация.....	11
1.2. Рельеф земной поверхности.....	12
1.3. Модели поверхностей Земли и рудных тел.....	14
1.4. Характерные элементы рельефа земной поверхности.....	17
1.5. Способы получения горизонталей рельефа земной поверхности.....	19
1.6. Некоторые формы рельефа.....	21
1.7. Рельеф геологических тел и его представление.....	24
1.8. Точность определения координат пластопересечений.....	30
2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	32
2.1. Классификация топографических поверхностей (по В. А. Букринскому).....	32
2.2. Виды сетей и способы интерполяции по плотности пикетных точек.....	34
3. АППРОКСИМАЦИЯ И ИНТЕРПОЛЯЦИЯ МОДЕЛИРУЕМЫХ ТОПОПОВЕРХНОСТЕЙ.....	40
3.1. Степень полноты и неопределённость исходной информации.....	40
3.2. Аппроксимация и интерполирование функций.....	41
4. АНАЛИЗ И СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ.....	46
4.1. Задачи анализа.....	46
4.2. Подходы к формированию непрерывных сетей. Тины и гриды.....	47
4.2.1. Общие сведения.....	47
4.2.2. Нерегулярная система треугольников (ТИНЫ).....	49
4.2.3. Регулярная сеть ячеек – гриды.....	52
4.2.4. Сочетание моделей TIN и GRID.....	53

4.2.5. Выбор размера ячейки грида .....	54
4.3. Выводы по разделу .....	56
<b>5. ОБЗОР МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ .....</b>	<b>61</b>
5.1. Общие сведения .....	61
5.2. Детерминированные модели .....	61
5.3. Стохастические модели .....	64
5.3. Искусственные нейронные сети .....	69
<b>6. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИСТИКИ .....</b>	<b>71</b>
6.1. Общие сведения .....	71
6.2. Статистические моменты .....	73
6.3. Исследование двумерных величин (корреляции и ковариации) .....	75
6.4. Элементы регрессионного анализа .....	78
6.5. Описание поверхности при помощи тренда .....	81
<b>7. СЛУЧАЙНЫЕ ФУНКЦИИ .....</b>	<b>84</b>
7.1. Общие понятия .....	84
7.1.1. Определение случайных функций по виду пространства состояния .....	84
7.1.2. Случайная функция и её реализации .....	86
7.1.3. Некоторые вероятностные статистические характеристики случайных функций .....	88
7.1.4. Типы случайных функций по характеру изменения их статистических характеристик .....	91
7.1.5. Автокорреляционная функция .....	92
7.1.6. Сведения о спектральной теории случайных процессов .....	98
7.1.7. Периодограмма и её использование .....	101
7.1.8. Стационарность случайной функции .....	103
7.1.9. Эргодическое свойство случайной величины .....	108
7.2. Компоненты случайной функции на примере временного ряда .....	110
7.2.1. Общие сведения .....	110
7.2.2. Виды трендов .....	113
7.3. Анализ тренда случайных функций .....	115
7.4. Пример обработки бороздовых проб .....	116

7.4.1. Построение тренда.....	116
7.4.2. Приведение случайной функции к стационарному виду выделением тренда .....	119
7.5. Двумерная автокорреляционная функция .....	123
7.6. Исследование участка земной поверхности на однородность .....	126
7.6.1. Предварительные исследования участка .....	126
7.6.2. Виды неравномерностей статистических характеристик изучаемого признака .....	130
7.7. Выделение тренда по площади (полиномом третьей степени) .....	131
7.8. Использование искусственных нейронных сетей для описания поверхности .....	134
7.9. Выводы по разделу .....	139
<b>8. ГЕОСТАТИСТИКА .....</b>	<b>141</b>
8.1. Общие сведения .....	141
8.2. Внутренняя гипотеза.....	149
8.3. Приведение к стационарному виду вычислением разностей.....	151
8.4. Вариограмма.....	155
8.4.1. Общие сведения .....	155
8.4.2. Анализ дисперсии приращений.....	160
8.4.3. Построение вариограмм .....	165
8.4.4. Двумерная автокорреляционная функция .....	174
8.4.5. Параметры типичной вариограммы .....	176
8.4.6. Особые случаи поведения вариограммы .....	180
8.4.7. Пример построения вариограмм по остаткам .....	182
8.4.8. Анизотропия.....	188
8.4.8.1. Анизотропия радиуса влияния (геометрическая).....	188
8.4.8.2. Зональная анизотропия .....	191
8.4.9. Построение вариограммы для остатков после ансамбля нейронных сетей.....	193
8.5. Модели вариограмм .....	195
8.5.1. Общие сведения .....	195
8.5.2. Некоторые базовые модели (применительно к программе Surfer) .....	198
8.5.3. Подбор теоретической модели вариограммы .....	206

8.5.4. Анализ вариограмм.....	210
8.5.5. Построение вариограммы .....	217
8.5.6. Функция автоподбора в программе Surfer.....	222
<b>9. МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ</b>	
<b>В ПО SURFER .....</b>	<b>225</b>
9.1. Некоторые факторы, требующие учёта при восстановлении поверхностей (применительно к ПО Surfer).....	225
9.1.1. Влияние параметров и учёт особенностей построения поверхностей .....	225
9.1.2. Точные интерполяторы и сглаживающие аппроксиматоры.....	227
9.1.3. Выбор области интерполяции .....	228
9.1.4. Граница нарушения пространственной непрерывности и линии изломов изолиний .....	231
9.1.5. Учёт анизотропии .....	234
9.2. Методы построения поверхностей в ПО Surfer (по руководству пользователя [31]) .....	234
9.2.1. Подготовка фрагмента карты для моделирования.....	234
9.2.2. Восстановление поверхности триангуляцией с линейной интерполяцией .....	236
9.2.3. Восстановление рельефа методом обратных расстояний IDP (Inverse Distance to Power).....	240
9.2.4. Метод минимальной кривизны.....	247
9.2.5. Модифицированный метод Шепарда .....	251
9.2.6. Метод естественной окрестности – Natural Neighbor.....	254
9.2.7. Метод ближайшего соседа – Nearest Neighbor.....	257
9.2.8. Полиномиальная регрессия – Polynomial Regression.....	259
9.2.9. Метод локальных полиномов – Local Polynomial.....	262
9.2.10. Метод скользящего среднего – Moving Average.....	267
9.2.11. Метод радиальных базисных функций (RBF).....	269
9.2.12. Метод Кригинга (Kriging) .....	273
9.2.13. Вычисление статистик – Data Metrics .....	275
<b>10. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ С ЦИФРОВЫМИ</b>	
<b>МОДЕЛЯМИ РЕЛЬЕФА (НА ПРИМЕРЕ ПО SURFER).....</b>	<b>276</b>
10.1. Общие сведения .....	276
10.2. Математические действия с поверхностями на примере программы Surfer .....	277

10.3. Трансформация грида (преобразование координат).....	280
10.4. Сглаживание и фильтрация грида .....	283
10.4.1. Общие сведения .....	283
10.4.2. Фильтрация ЦМР в программе Surfer .....	286
10.4.3. Сплайновое сглаживание .....	296
10.5. Проект вертикальной планировки площадки .....	300
10.5.1. Общие сведения .....	300
10.5.2. Планировочная сетка.....	304
10.5.3. Подсчёт объёмов земляных работ .....	306
<b>11. ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦМР.....</b>	<b>313</b>
11.1. Общие сведения о морфометрии .....	313
11.2. Морфометрические параметры.....	316
11.3. Операции над цифровыми моделями рельефа и их преобразования .....	319
11.4. Построение морфометрических карт .....	321
11.4.1. Выделение структуры рельефа.....	321
11.5. Процедуры фильтрации по шаблону.....	324
11.6. Аппроксимация производных конечными разностями .....	326
11.7. Вычисления производных .....	330
11.7.1. Использование шаблона для вычисления производной .....	330
11.7.2. Основные геоморфометрические параметры, рассчитываемые на основе производных первого порядка ...	333
11.7.2.1. Направленные производные.....	333
11.7.2.2. Моделирование рельефа .....	337
11.7.2.3. Дифференциальные и интегральные операторы.....	348
11.7.2.4. Анализ Фурье и спектральный анализ .....	358
11.8. Построение водотоков и водоразделов .....	359
11.9. Генерализация данных .....	366
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>368</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>371</b>
Приложение А. Вычисление наклонов интервалов выработки .....	381
Приложение Б. Таблица высотных отметок по выработке и их разностей .....	382