

*На правах рукописи*

**Флоринский Игорь Васильевич**

**ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ  
МАТЕМАТИКО-КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
РЕЛЬЕФА**

Специальность 25.00.33 – картография

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Институте математических проблем биологии РАН

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, старший научный сотрудник  
Флегонтов Александр Валентинович

доктор технических наук, профессор  
Лисицкий Дмитрий Витальевич

доктор географических наук, старший научный сотрудник  
Линник Виталий Григорьевич

**Ведущая организация:**

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,  
Географический факультет, Кафедра картографии и геоинформатики

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2010 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.01 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер. 4, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИИГАиК.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета \_\_\_\_\_ Б.В. Краснопевцев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Рельеф является одним из основных факторов, определяющих ход и направленность процессов, протекающих в приповерхностном слое планеты. В частности, рельеф является одним из факторов почвообразования, так как во многом определяет микроклиматические и метеорологические характеристики, влияющие на гидрологический и тепловой режим почв (Geiger, 1927; Романова, 1977; Кондратьев и др., 1978), и предпосылки латерального переноса воды и других веществ вдоль земной поверхности и в почве под действием гравитации (Kirkby, Chorley, 1967; Speight, 1974). Вместе с тем, будучи результатом взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов, рельеф выступает индикатором геологического строения территории (Penck, 1924; Герасимов, 1959; Мещеряков, 1965; Уфимцев, 1984; Костенко, 1999; и др.). В этой связи, информация о рельефе широко применяется в науках о Земле, инженерных изысканиях, проектировании и строительстве.

До 1990-х гг. основным источником количественной информации о рельефе являлись топографические карты, при анализе которых использовался методический аппарат морфометрии (Ченцов, 1948; Волков, 1950; Strahler, 1956; Девдариани, 1967; Спиридонов, 1975; Червяков, 1984; Пириев, 1985; Ласточкин, 1987; Симонов, 1998; и др.). Как составная часть картографического метода исследования (Салищев, 1955; Берлянт, 1978, 1986) и математико-картографического моделирования (Жуков и др., 1980; Сербенюк, 1990), морфометрические подходы получили распространение в геологии и почвоведении (Философов, 1960; Романова, 1971; Ранцман, 1979; Волчанская, 1981; и др.).

В середине 1950-х гг. в фотограмметрии возникло новое направление – цифровое моделирование рельефа – первой областью применения которого стало проектирование и строительство линейных сооружений (Miller, Leflamme, 1958; Коновалов, 1960). В рамках этого направления основными носителями информации о рельефе стали цифровые модели высоты (ЦМВ), используемые для расчетов цифровых моделей морфометрических характеристик рельефа (цифровых моделей рельефа, ЦМР). По мере развития компьютерных технологий, цифровое моделирование рельефа оформилось в научную дисциплину,

предметом которой является количественное моделирование и анализ рельефа земной (планетарной) поверхности, а также взаимосвязей между рельефом и другими компонентами геосистем. Усложнение задач исследований, необходимость снижения уровня их субъективности и обеспечения воспроизводимости определили переход от традиционных морфометрических методов к цифровому моделированию (Evans, 1972; Кошкарев, 1982; Burrough, 1986; Dikau, 1988; Сербенюк, 1990). В настоящее время цифровое моделирование рельефа широко используются для решения задач геоморфологии, гидрологии, дистанционного зондирования, почвоведения, геологии, геоботаники, гляциологии и других наук о Земле, а также при инженерных изысканиях (Moore et al., 1991; Florinsky, 1998; Terrain Analysis..., 2000; Li et al., 2001; Shary et al., 2002; Новаковский и др., 2003).

В почвоведении и геологии первые работы с использованием ЦМР были проведены в 1960-е гг. (Troeh, 1964; Белонин, Жуков, 1968). В 1980-е гг. определились два основных тренда использования ЦМР в этих науках: анализ и моделирование почвенных свойств (Burt, Butcher, 1985; Pennock et al., 1987) и выявление и анализ геологических структур (Moore, Simpson, 1983; Schowengerdt, Glass, 1983). В 1990-е гг. начался массовый переход от традиционных морфометрических методов к цифровому моделированию рельефа в почвоведении (Martz, de Jong, 1990; Odeh et al., 1991; Moore et al., 1993; Quinn, Beven, 1993; Bell et al., 1994; King et al., 1999; и др.) и в геологии (Chorowicz et al., 1991; Onorati et al., 1992; Иоффе, Кожурин, 1997; Johansson, 1999; и др.).

В начале 1990-х гг. стало очевидно, что для корректного использования ЦМР в почвенных и геологических исследованиях и обоснованных интерпретаций получаемых результатов требуются специализированные методы, учитывающие специфику предмета изучения (отношения «рельеф–почва» и «рельеф–геологическое строение»). Отсутствие таких методов снижало эффективность использования крупно- и среднемасштабных ЦМР при изучении почвы на уровне делянки, поля и региона, и ограничивало использование региональных, континентальных и глобальных ЦМР в геологии. В основе методов анализа и моделирования почвенных свойств и геологических структур на базе ЦМР

должны были лежать специальные вычислительные методы, позволяющие рассчитывать ЦМР на основных типах сетки и обеспечивающие моделирование рельефа при решении задач широкого масштабного диапазона. Таким образом, требовалось создать двухуровневую систему методов математико-картографического моделирования рельефа: I уровень – вычислительные методы, позволяющие рассчитывать ЦМР; II уровень – методы анализа, моделирования и картографирования почвенных свойств и геологических структур на основе полученных ЦМР. Решению этой проблемы посвящена диссертационная работа.

**Цель исследования:** теоретически обосновать, разработать и практически использовать систему методов математико-картографического моделирования рельефа для почвенных и геологических исследований. Для этого решались следующие задачи:

1. Разработать вычислительные методы для расчета цифровых моделей морфометрических характеристик по ЦМВ, построенным на сетках различной геометрии с широким диапазоном линейного и углового разрешения. Обеспечить при этом моделирование и анализ рельефа различного уровня иерархии при решении задач широкого масштабного диапазона (делянка – поле – ландшафт – регион – континент – планета).

2. Разработать метод оценки точности цифровых моделей морфометрических характеристик.

3. Разработать метод определения компетентного разрешения ЦМР для почвенных исследований.

4. Разработать метод анализа, моделирования и картографирования пространственного распределения физических, химических и биологических свойств почвы на основе цифрового моделирования рельефа.

5. Разработать метод выявления и типизации выраженных в рельефе линейных элементов на основе цифрового моделирования рельефа.

6. Разработать программное обеспечение, реализующее указанные методы математико-картографического моделирования рельефа.

7. Применить разработанные методы для решения задач почвоведения и геологии.

**Объект исследования** – рельеф. **Предмет исследования** – моделирование рельефа и отношений «рельеф–почва» и «рельеф–геологическое строение».

**Районы исследования.** Возможности вычислительных методов моделирования рельефа показаны на примере территорий г. Москвы, Крыма, Курской обл., Ставропольского края и Эквадора (региональные уровни), а также Русской равнины и прилегающих территорий (субконтинентальный уровень). Математико-картографическое моделирование рельефа для почвенных исследований на уровне делянки и поля проводилось на трех участках: один расположен в г. Пущино (Московская обл.), а два – на юге провинции Манитоба (Канада). Возможности моделирования рельефа для региональных геологических исследований показаны на примере Крыма и Курской обл., а для изучения глобальной тектоники – на примере Земли, Марса, Венеры и Луны.

#### **Исходные материалы:**

1. ЦМВ: а) детальная ЦМВ – результат тахеометрической съемки, проведена Г.А.Куряковой (МИИГАиК) и автором; б) 2 детальные ЦМВ, полученные с помощью кинематической GPS-съемки сотрудниками Agriculture and Agri-Food Canada и Univ. Manitoba в рамках совместных исследований; в) 3 региональные ЦМВ, полученные автором путем оцифровки горизонталей топографических карт; г) 3 региональные ЦМВ кровли стратиграфических горизонтов, полученные автором, М.Ю.Маркузе и А.И.Ефременко (МИИГАиК) с помощью оцифровки фондовых геолого-геофизических картографических материалов (предоставлены А.И.Полетаевым, МГУ); д) 4 глобальные ЦМВ Земли ETOPO2, GTOPO30, GLOBE и SRTM3 (архивы NOAA, USGS и NASA); е) 4 глобальные ЦМВ Марса, Венеры и Луны (архивы NASA).

2. Результаты почвенных опробований и лабораторных анализов. Полевые и лабораторные работы в г. Пущино выполнены автором, Г.А.Куряковой (МИИГАиК) и П.А.Шарым (ИФХБПП РАН), а в Канаде – сотрудниками Agriculture and Agri-Food Canada и Univ. Manitoba.

3. Опубликованные и фондовые геологические карты и схемы.

**Методы исследований.** Использовались методы линейной алгебры, вы-

числительной математики, цифрового моделирования рельефа, математической статистики, геоинформатики, картографический метод исследования.

### **Научная новизна:**

1. Теоретически обоснована и разработана система методов математико-картографического моделирования рельефа для почвенных и геологических исследований.

2. Разработаны два новых вычислительных метода, позволяющие рассчитывать модели локальных морфометрических характеристик на квадратной сетке и сетке сфероидических трапеций. Метод расчета на квадратной сетке обладает наивысшей точностью среди аналогов; предназначен для детальных и региональных исследований. Метод расчета на сетке сфероидических трапеций аналогов не имеет; предназначен для региональных, континентальных и глобальных исследований.

3. Разработан новый вычислительный метод для оценки точности расчета локальных морфометрических характеристик по критерию средней квадратической ошибки функции измеренных величин. Метод позволяет получать карты средних квадратических ошибок расчета характеристик рельефа на квадратной сетке и сетке сфероидических трапеций.

4. Разработан новый метод определения компетентного разрешения ЦМР для почвенных исследований на основе графического представления коэффициентов корреляции между характеристиками почвы и рельефа в зависимости от шага сетки ЦМР.

5. Разработан способ анализа, моделирования и картографирования пространственного распределения свойств почвы на основе цифрового моделирования рельефа, корреляционного анализа и множественного регрессионного анализа, в котором предикторами являются морфометрические характеристики.

6. Разработан новый метод выявления и типизации выраженных в рельефе линеаментов на основе картографирования горизонтальной ( $k_h$ ) и вертикальной ( $k_v$ ) кривизн поверхности. Линеаменты, регистрируемые на картах  $k_h$ , связаны с дислокациями, образованными преимущественно горизонтальными движениями. Линеаменты, фиксируемые на картах  $k_v$ , связаны со структурами, образо-

ванными, в основном, вертикальными движениями.

7. Разработанные методы математико-картографического моделирования позволили получить ряд новых фундаментальных результатов:

– На примере черноземовидных почв агроландшафтов Северной Америки впервые установлено, что пространственное распределение динамических свойств почвы зависит от характеристик рельефа лишь в том случае, если содержание влаги в почве превышает некоторый пороговый уровень.

– Для тектонического унаследованного рельефа впервые на количественном уровне доказано, что зоны аккумуляции поверхностных потоков, как правило, совпадают с узлами пересечения линеаментов.

– Впервые с использованием количественных данных и численных методов подтверждена гипотеза существования на Земле двойных спиралевидных структур планетарного ранга, выраженных в рельефе и, вероятно, связанных с ротационными напряжениями земной коры.

#### **Практическая значимость:**

1. Разработанные методы расширяют возможности применения математико-картографического моделирования рельефа в почвенных и геологических исследованиях и инженерных изысканиях. В частности, разработанные вычислительные методы могут применяться для обработки ЦМВ, полученных любым способом. Они позволяют рассчитывать морфометрические характеристики на двух основных типах регулярных сеток с любым линейным или угловым разрешением. Это позволяет анализировать рельеф любого уровня иерархии при решении задач любого масштаба.

2. Разработанные методы обладают высокой эффективностью, что подтверждается полученными с их помощью новыми фундаментальными результатами. В этой связи разработанные методы могут быть приняты в качестве стандартных схем моделирования рельефа в почвоведении и геологии. Разработанные вычислительные методы могут использоваться для решения задач других наук о Земле.

3. Разработанные методы могут применяться при инженерных изысканиях, проектировании, строительстве, трассировании линейных сооружений раз-



личного типа, мелиоративном строительстве, проектировании, строительстве и мониторинге объектов повышенного риска.

**На защиту выносятся** теория, система методов и результаты математико-картографического моделирования рельефа, а именно:

1. Вычислительные методы расчета локальных характеристик рельефа на квадратной сетке и сетке сфероидических трапеций.

2. Вычислительный метод оценки точности расчета локальных характеристик рельефа.

3. Метод определения компетентного разрешения ЦМР для почвенных исследований и способ анализа, моделирования и картографирования свойств почвы на основе ЦМР.

4. Метод выявления и типизации линеаментов на основе ЦМР.

5. Результаты математико-картографического моделирования:

– для решения задач детального и регионального уровня в почвоведении и геологии;

– для исследования тектонических структур планетарного масштаба.

#### **Реализация результатов работы:**

1. Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ ИМПБ РАН.

2. Значительная часть исследований выполнена в рамках российско-канадских научных проектов, в которых автор был соруководителем или ответственным исполнителем: NATO Collaborative Research Grant ENVIR.CRG.950218 “Prediction of migration and accumulation of toxic substances in landscape” (1995–1996), NSERC Visiting Fellowship in Canadian Government Laboratories “Landscape modelling for sustaining agricultural productivity and environmental quality in the Prairie Ecozone through integration of emerging geo-technologies” (1998–2000), NATO Collaborative Linkage Grant LST.CLG.976677 “Predicting the spatial variability of herbicide sorption at the field-scale” (2000–2002).

3. Под руководством автора группой программистов создана программа LandLord, реализующая разработанную автором систему методов моделирова-

ния рельефа. Состав группы: Т.И.Грохлина, Н.Л.Михайлова, Г.Л.Андриенко (ИМПБ РАН), Н.В.Андриенко (ПущГУ) и П.В.Козлов (ЦВ «Протек»). Программа систематически используется в ИМПБ РАН, использовалась в Российском экологическом федеральном информационном агентстве Минприроды РФ, Agriculture and Agri-Food Canada и Univ. Manitoba, а также в диссертационных работах Г.А.Куряковой (МИИГАиК) и D.A.Whetter (Univ. Manitoba).

**Личный вклад.** В диссертации изложены результаты многолетних теоретических и прикладных работ автора. Им теоретически обоснованы и разработаны все методы математико-картографического моделирования рельефа, выносимые на защиту. Автором выведены все формулы защищаемых вычислительных методов. Семь ЦМВ, используемых в диссертации, составлены лично автором или при его участии. Им выполнены расчеты всех ЦМР и построение всех морфометрических карт. Автор принимал участие в полевых и лабораторных работах. Им лично проведен статистический анализ почвенных и морфометрических данных, картографирование почвенных свойств, последующий анализ и интерпретация полученных результатов. Автором лично проведен совместный анализ геологических материалов и морфометрических карт и интерпретация полученных результатов. Ранние версии расчетных модулей программы LandLord, а также вьювер были написаны группой программистов под руководством автора. Автором лично написана на языке Delphi и отлажена последняя версия программы LandLord 4.0.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов и выводов подтверждаются: а) корректным применением методов линейной алгебры, вычислительной математики, математической статистики и геоинформатики; б) использованием достоверных исходных данных о рельефе, характеристиках почвы и геологическом строении изучаемых территорий; в) результатами проведенных компьютерных экспериментов; г) независимыми геологическими источниками; д) публикациями автора в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на

Всес. конф. «Современные проблемы географии и картографии почв» (Москва, 1991), 2-ом Всес. семинаре «Нетрадиционные методы геофизических исследований неоднородностей в земной коре» (Москва, 1992), Геол. секции МОИП (Москва, 1992), 15<sup>th</sup> World Congr. Soil Science (Асапулко, 1994), 7-ой Межд. конф. «Математические методы распознавания образов» (Пушино, 1995), Annual Meetings, Canadian Society of Soil Science (Charlottetown, 1999; Winnipeg, 2000), Int. Congr. Ecosystem Health (Sacramento, 1999), Annual Meetings, Manitoba Society of Soil Science (Winnipeg, 1999, 2000, 2001), Отд. картографии и аэрокосмических методов РГО (Москва, 2006), Int. Symp. Terrain Analysis & Digital Terrain Modelling (Nanjing, 2006), XIV и XVI науч. семинарах «Система Планета Земля (Нетрадиционные вопросы геологии)» (Москва, 2006, 2008), 4<sup>th</sup> National Cartographic Conf. GeoCart'2008 (Auckland, 2008), а также на научных семинарах Лаб. космической геологии МГУ (Москва, 1991), Centre d'applications et de recherche en télédétection, Univ. Sherbrooke (Sherbrooke, 1995), Centre for Research in Geomatics, Univ. Laval (Quebec, 1995), Каф. системной экологии ПущГУ (Пушино, 1997), Brandon Research Centre, Agriculture and Agri-Food Canada (Brandon, 1998), Land Resource Unit Network, Agriculture and Agri-Food Canada (Ottawa, 1999), Dep. Geography, Simon Fraser Univ. (Vancouver, 2001), Canadian Great Plains Greenhouse Gas Program Team (Saskatoon, 2001), Фак. почвоведения МГУ (1996, 2005) и Ин-та геоэкологии РАН (Москва, 2006).

Согласно Google Scholar, на 20 января 2010 г. работы автора цитировались в 356 научных публикациях (без самоцитирования).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 70 работ, в том числе 31 статья в научных журналах, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК. Из них: 15 статей в российских журналах и 16 статей в зарубежных журналах, включенных в систему цитирования Web of Science “Science Citation Index Expanded”.

**Структура и объем.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (506 наименований) и приложения. Общий объем: 267 страниц, включая 77 рисунков и 19 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы, излагаются цель и задачи работы, указаны научная новизна, положения, составляющие предмет защиты, и практическая значимость работы.

**В первой главе** изложены основные понятия, подходы и методы математико-картографического моделирования рельефа.

В разделе 1.1 рассмотрены способы получения ЦМВ, типы сеток и разрешающая способность ЦМР. Даны определения, формулы, интерпретации и методы расчета для четырех групп морфометрических характеристик, к которым относятся: 1) Локальные характеристики – крутизна ( $G$ ), экспозиция ( $A$ ), горизонтальная ( $k_h$ ), вертикальная ( $k_v$ ), средняя ( $H$ ), минимальная ( $k_{min}$ ), максимальная ( $k_{max}$ ) кривизны и др.; 2) Нелокальные характеристики – водосборная площадь ( $CA$ ) и др.; 3) Комбинированные характеристики – топографический индекс ( $TI$ ) и др.; 4) Структурные линии рельефа. Изложена концепция зон относительной аккумуляции.

Раздел 1.2 посвящен проблеме ошибок и точности ЦМР. Рассмотрены источники и типы ошибок ЦМВ. Детально разобраны ошибки ЦМР, возникающие из-за игнорирования следствий теоремы Котельникова и явления Гиббса при интерполяции, и ошибки дискретизации при сдвиге сетки. Доказана изотропия операторов локальных характеристик рельефа.

Раздел 1.3 посвящен фильтрации ЦМР, к задачам которой относятся: 1) выделение низко- и высокочастотных компонент топографической поверхности при изучении иерархической структуры рельефа; 2) подавление высокочастотного шума; и 3) генерализация ЦМР. Показано, что двумерный анализ сингулярного спектра (Голяндина, Усевич, 2008) является эффективным средством для решения задач фильтрации.

В разделе 1.4 аргументируется необходимость разработки системы методов математико-картографического моделирования рельефа.

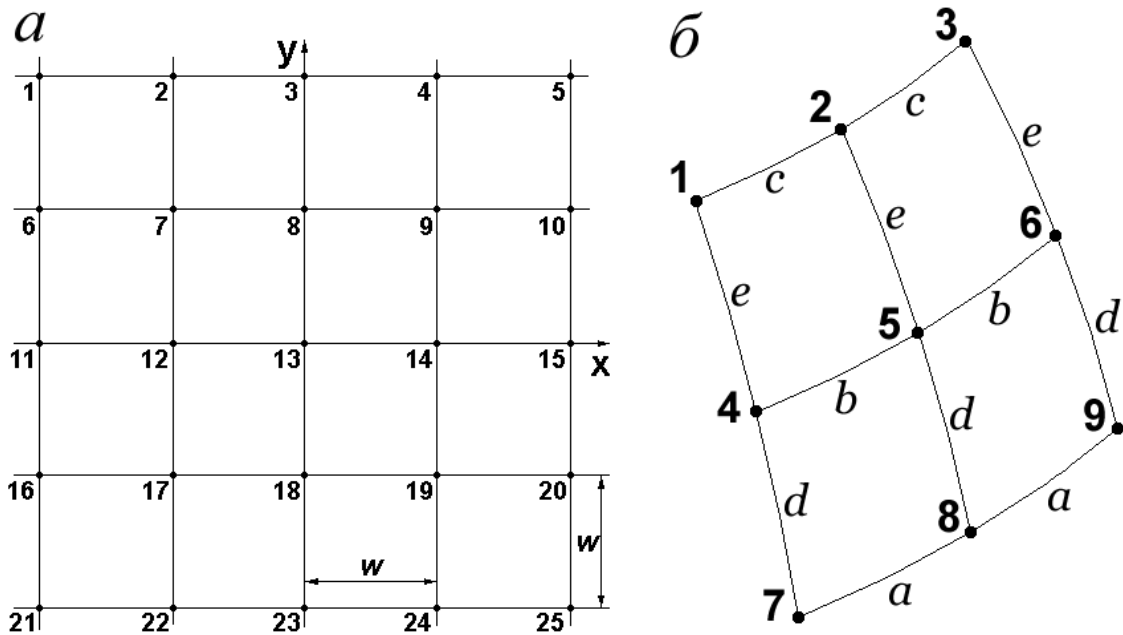


Рис. 1. Скользящие окна: *a* – плоское квадратное окно  $5 \times 5$ ,  $w$  – шаг сетки, 1, ..., 25 – номера точек; *б* – сфероидическое трапецеидальное окно  $3 \times 3$ , *a, b, c, d* и *e* – линейные элементы окна, 1, ..., 9 – номера точек

**Во второй главе** описаны разработанные автором вычислительные методы математико-картографического моделирования рельефа.

В разделе 2.1 описан разработанный автором метод расчета локальных характеристик рельефа на квадратной сетке. Локальные характеристики рельефа

являются функциями частных производных высоты  $r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$ ,  $t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$ ,  $s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$ ,

$p = \frac{\partial z}{\partial x}$ ,  $q = \frac{\partial z}{\partial y}$ , где  $z = f(x, y)$  – высота,  $x$  и  $y$  – декартовы координаты. При

проведении детальных и региональных почвенных и геологических исследований значения  $r, t, s, p$  и  $q$  могут быть рассчитаны по ЦМВ на квадратной сетке с помощью методов, основанных на аппроксимации частных производных конечными разностями (напр., методом Эванса, в котором полином 2-го порядка приближается к скользящему окну  $3 \times 3$ ).

Автором разработан новый метод, в котором полином 3-го порядка с помощью метода наименьших квадратов приближается к окну  $5 \times 5$  (рис. 1а). Выведены формулы для частных производных высоты (определяются для цен-

тральной точки окна). Например, формула  $r$  имеет вид:

$$r = \frac{1}{35w^2} [2(z_1 + z_5 + z_6 + z_{10} + z_{11} + z_{15} + z_{16} + z_{20} + z_{21} + z_{25}) - \\ - 2(z_3 + z_8 + z_{13} + z_{18} + z_{23}) - \\ - z_2 - z_4 - z_7 - z_9 - z_{12} - z_{14} - z_{17} - z_{19} - z_{22} - z_{24}], \quad (1)$$

где  $z_1, \dots, z_{25}$  – известные значения высоты в точках 1, ..., 25 окна  $5 \times 5$ . Перемещая окно по ЦМВ, значения частных производных и, соответственно, локальных морфометрических характеристик рассчитываются для всех точек ЦМВ, кроме двух крайних строк и столбцов.

В отличие от существующих, разработанный метод позволяет рассчитывать не только первые и вторые, но и третьи частные производные высоты. Доказано, что, по сравнению с существующими методами, разработанный метод обеспечивает более высокую точность расчета характеристик рельефа и сильнее подавляет высокочастотный шум в ЦМВ. При этом, по простоте и скорости вычислений разработанный метод сопоставим с существующими методами. Пример расчета и картографирования локальных параметров рельефа с помощью разработанного метода представлен на рис. 2. Метод используется в разд. 3.2, 3.4, 4.1 и 4.2.

В разделе 2.2 описан разработанный автором метод расчета локальных морфометрических величин на сетке сфероидических трапеций.

Многие национальные, глобальные и планетарные ЦМВ (ETOPO2, GTOPO30, GLOBO, SRTM и др.) построены по сеткам сфероидических трапеций (с равным угловым шагом по широте и долготе), образуемых точками пересечения параллелей и меридианов. Вместе с тем, для расчета локальных морфометрических характеристик обычно используются методы, предназначенные для ЦМВ, которые заданы на квадратных сетках точек с равным линейным шагом. Так как квадратная сетка и сетка сфероидических трапеций имеют принципиально разную геометрию, методы, предназначенные для расчетов частных производных на квадратной сетке, нельзя применять для расчетов на сетке сфероидических трапеций.

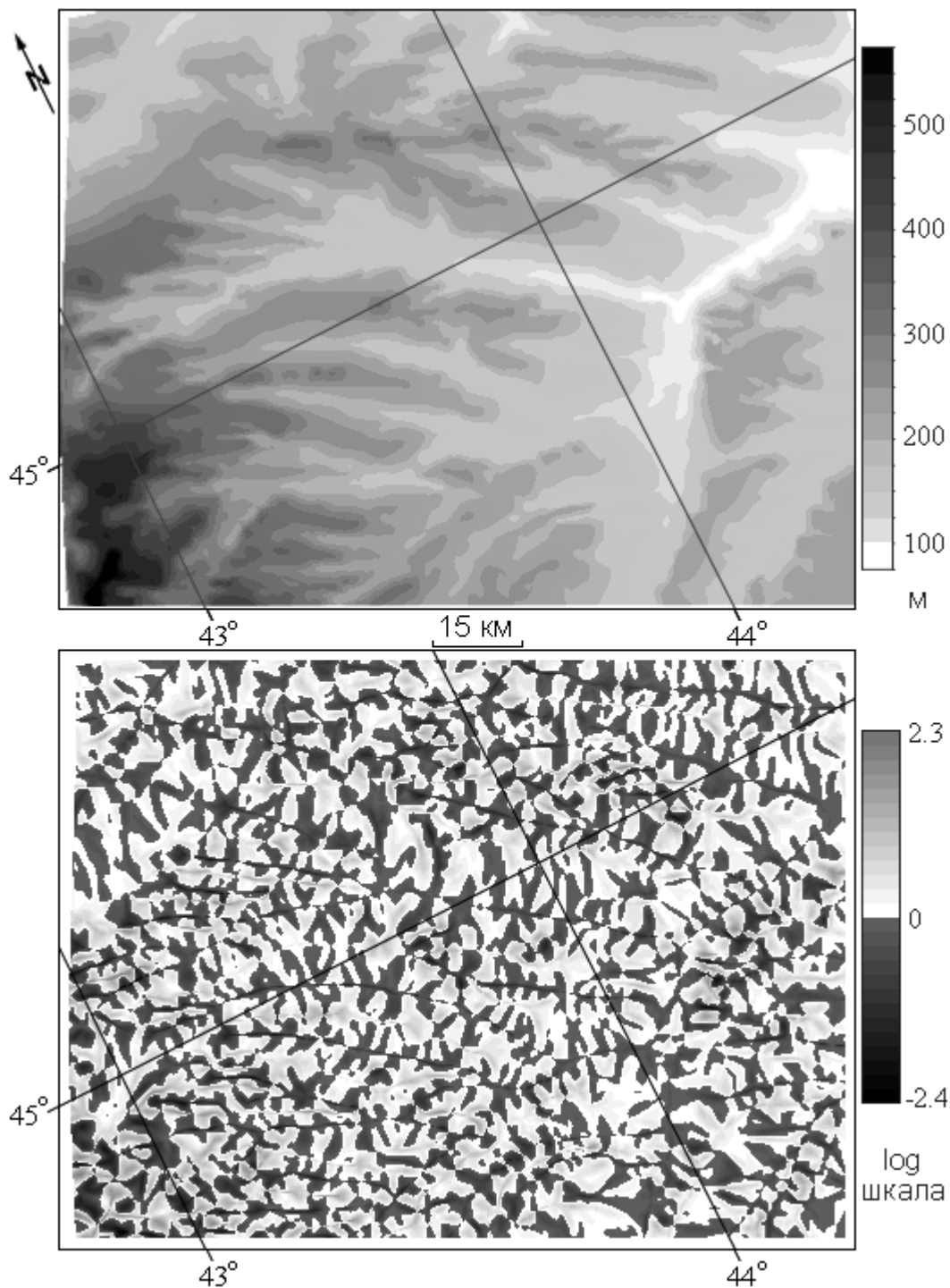


Рис. 2. Междуречье Кумы и Калауса: высоты (вверху) и горизонтальная кривизна (внизу). Исходная нерегулярная ЦМВ (2571 точка) получена с помощью оцифровки топографической карты масштаба 1 : 1 000 000;  $w = 300$  м. Здесь и в ряде других иллюстраций логарифмическое трансформирование выполнено по формуле  $\Theta' = \text{sign}(\Theta) \cdot \ln(1 + 10^{nm}|\Theta|)$  (Shary et al., 2002), где  $\Theta$  – значение морфометрической характеристики;  $n = 0$  для нелокальных и  $n = 2, \dots, 9$  для локальных характеристик;  $m = 1, 2$

Автором впервые разработан метод, в котором полином 2-го порядка с помощью метода наименьших квадратов приближается к скользящему сфероидическому трапецеидальному окну  $3 \times 3$  (рис. 1б). Выведены формулы для  $r, t, s, p$  и  $q$ , рассчитываемые для центральной точки окна. Например, формула  $r$  имеет вид:

$$r = \frac{c^2(z_1 + z_3 - 2z_2) + b^2(z_4 + z_6 - 2z_5) + a^2(z_7 + z_9 - 2z_8)}{a^4 + b^4 + c^4}, \quad (2)$$

где  $z_1, \dots, 9$  – известные значения высоты в точках 1, ..., 9 окна  $3 \times 3$ . Перемещая скользящее окно по ЦМВ, вычисляются значения  $r, t, s, p, q$ , и, соответственно, локальных морфометрических характеристик для всех точек ЦМВ, кроме крайних строк и столбцов. Если обрабатывается глобальная виртуально замкнутая ЦМВ, расчет проводится для всех ее точек. Размеры элементов окна вычисляются по известным формулам со средними аргументами для решения обратной геодезической задачи при малых расстояниях.

Пример расчета и картографирования параметров рельефа с помощью разработанного метода представлен на рис. 3. Метод используется в разд. 1.3 и 4.3.

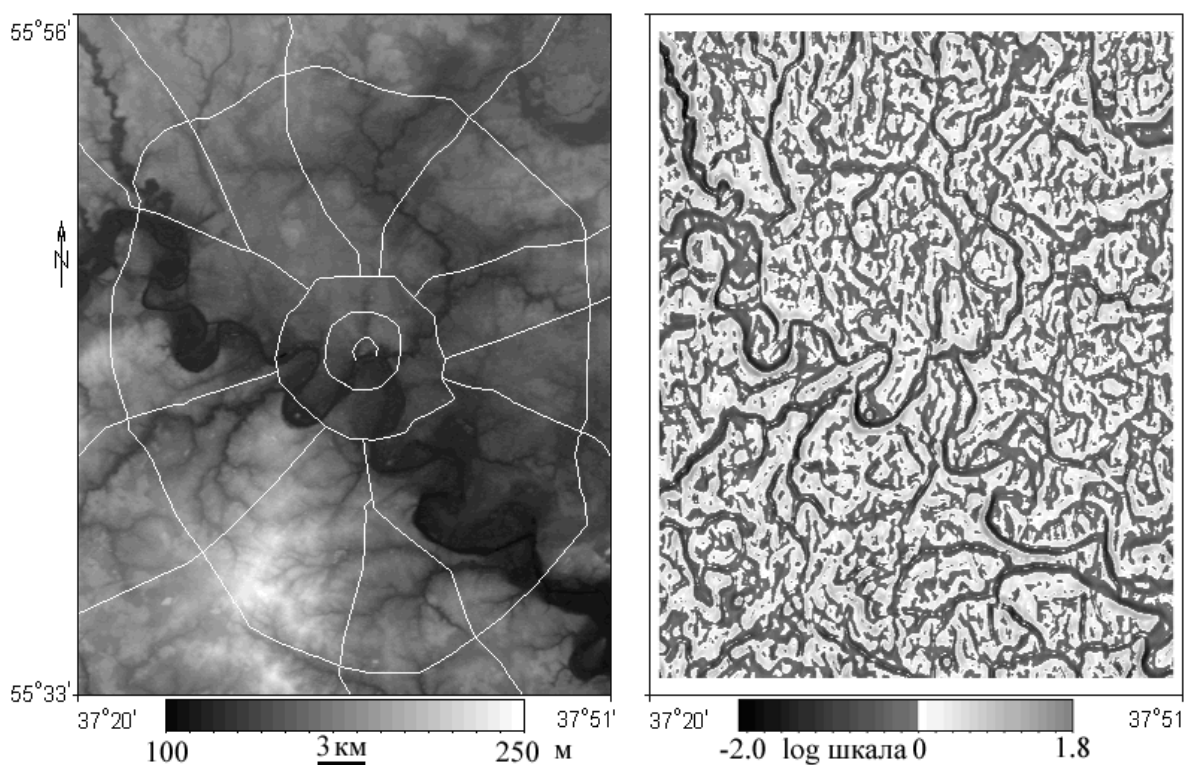


Рис. 3. Москва и прилегающие районы: высоты (слева) и вертикальная кривизна (справа). ЦМВ из архива SRTM; шаг сетки 3", 284544 точки



В разделе 2.3 описан разработанный автором метод оценки точности расчета локальных морфометрических характеристик  $F$  ( $k_h, k_v, H, k_{min}, k_{max}$  и др.) по критерию средней квадратической ошибки функции измеренных величин  $m_F$  ( $m_{kh}, m_{kv}, m_H, m_{kmin}, m_{kmax}$ , соответственно).

Выведены формулы  $m_F$ . Метод предусматривает расчет  $m_F$  в каждой точке ЦМВ. Значения  $m_F$  вычисляются для центральной точки скользящего окна, перемещаемого по ЦМВ. Например, формула  $m_{kh}$  имеет вид:

$$m_{kh} = \frac{1}{p^2 + q^2} \left( \frac{1}{1 + p^2 + q^2} \times \right. \\ \times \left\{ m_p^2 \left[ p(q^2r - 2pqs + p^2t) \left( \frac{2}{p^2 + q^2} + \frac{1}{1 + p^2 + q^2} \right) + 2(qs - pt) \right]^2 + \right. \\ \left. + m_q^2 \left[ q(q^2r - 2pqs + p^2t) \left( \frac{2}{p^2 + q^2} + \frac{1}{1 + p^2 + q^2} \right) + 2(ps - qr) \right]^2 + \right. \\ \left. + m_r^2 q^4 + 4m_s^2 p^2 q^2 + m_t^2 p^4 \right\} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где  $m_p, m_q, m_r, m_s$  и  $m_t$  – средние квадратические ошибки вычисления  $p, q, r, s$  и  $t$ , соответственно.

$p, q, r, s$  и  $t$  являются функциями значений высоты  $z_i$  в точках скользящего окна, где  $i = 1, 2 \dots 9$  для метода Эванса и авторского метода расчета частных производных на сетке сфероидических трапеций (разд. 2.2);  $i = 1, 2 \dots 25$  для авторского метода расчета частных производных на квадратной сетке (разд. 2.1). Если  $m_{z_1} = m_{z_2} = \dots = m_{z_i} = m_z$ , где  $m_{z_1}, m_{z_2}, \dots, m_{z_i}$  – средние квадратические ошибки  $z_1, z_2, \dots, z_i$ , соответственно, то при расчетах на квадратной сетке выведенные автором формулы  $m_p, m_q, m_r, m_s$  и  $m_t$  имеют вид, представленный в табл. 1. Аналогичные формулы выведены автором для расчетов на сетке сфероидических трапеций.

Удобством и преимуществом разработанного метода является возможность наглядно отображать на карте пространственное распределение средних

Таблица 1. Средние квадратические ошибки расчета частных производных высоты на квадратной сетке для метода Эванса и авторского метода (разд. 2.1)

Средняя квадратическая ошибка	Метод Эванса	Авторский метод
$m_p$ и $m_q$	$m_z/(\sqrt{6}w)$	$\sqrt{527/70} m_z/(6w)$
$m_r$ и $m_t$	$\sqrt{2}m_z/w^2$	$\sqrt{2/35} m_z/w^2$
$m_s$	$m_z/(2w^2)$	$m_z/(10w^2)$

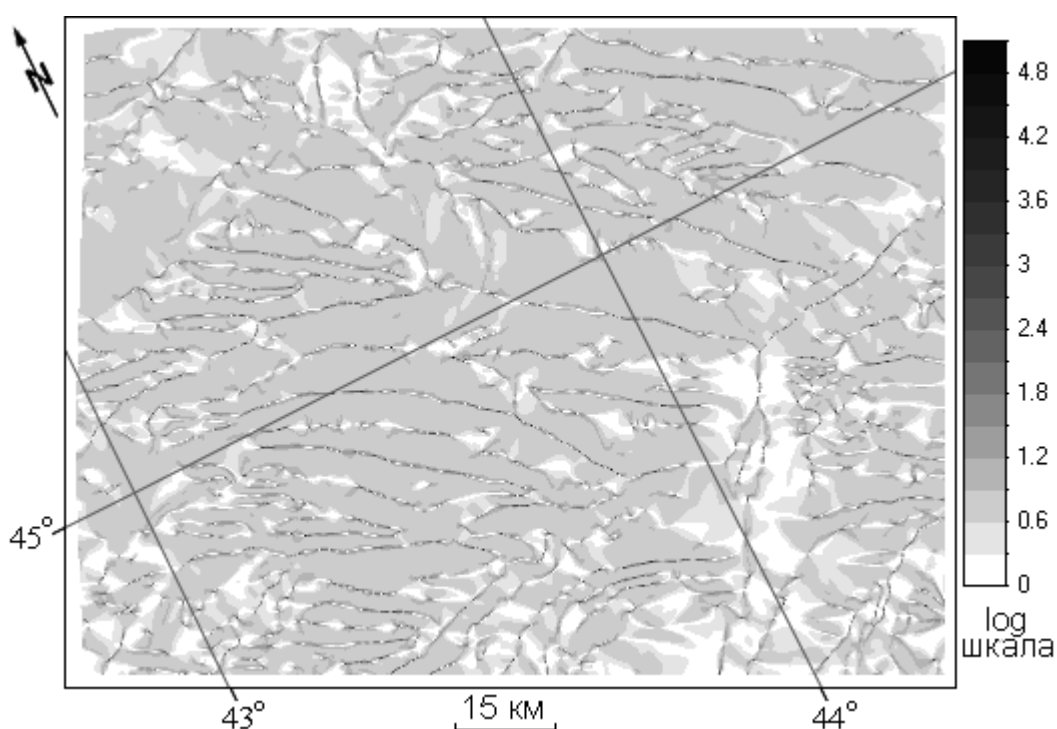


Рис. 4. Междуречье Кумы и Калауса (рис. 2): карта средней квадратической ошибки расчета горизонтальной кривизны по авторскому методу (разд. 2.1)

квадратических ошибок расчета ЦМР (рис. 4).

**Третья глава** посвящена вопросам использования математико-картографического моделирования рельефа в почвенных исследованиях.

В разделе 3.1 дан обзор закономерностей влияния рельефа на почвенные свойства на примере распределения влаги в почве.

В разделе 3.2 описан разработанный автором метод определения компетентного шага сетки ( $w$ ) ЦМР для анализа, моделирования и картографирования свойств почвы.

Одной из основных проблем совместного анализа ЦМР и почвенных данных является определение  $w$ , который обеспечивает корректный анализ и моделирование взаимосвязей между параметрами рельефа и почвы. Как правило, задача выбора такого компетентного  $w$  решается путем экспертной оценки, которая всегда субъективна. Произвольный выбор  $w$  может приводить к получению некорректных результатов.

Разработанный метод основан на ряде положений концепции репрезентативного объема (Ситников, 1978) и включает следующие этапы:

1) Получение серии регулярных ЦМВ делянки с использованием различных значений  $w$ .

2) Расчет по этим ЦМВ моделей морфометрических характеристик.

3) Корреляционный анализ характеристик почвы и рельефа в пределах делянки (размер выборки – не менее 40).

4) Графическое представление коэффициентов корреляции как функции разрешения ЦМР. Выположенные участки графиков (для статистически значимых значений) идентифицируют компетентный шаг сетки.

Эффективность разработанного метода показана на примере анализа влияния рельефа на пространственное распределение влажности поверхностного слоя почвы (*Moist*). Эксперимент проводился на участке залесенного оврага в окрестностях г. Пущино (Московская обл.). Отбор почвенных образцов проводился на глубине 10 см в 62 точках, расположенных вдоль горизонтали 4,25 м, в течение 1 часа, что предотвратило существенное влияние испарения на содержание влаги в образцах. ЦМВ участка (374 точки) составлена по результатам тахеометрической съемки.

Рассматривалась зависимость *Moist* от  $G$ ,  $k_h$ ,  $k_v$  и  $H$ . ЦМР были рассчитаны по авторскому методу (разд. 2.1) для 13 значений  $w$  – от 1 до 7 м. Было установлено, что в данных природных условиях область компетентных  $w$  применительно к *Moist* ( $W_2$ ) лежит в интервале от 2,5 м до 3 м включительно (рис. 5).

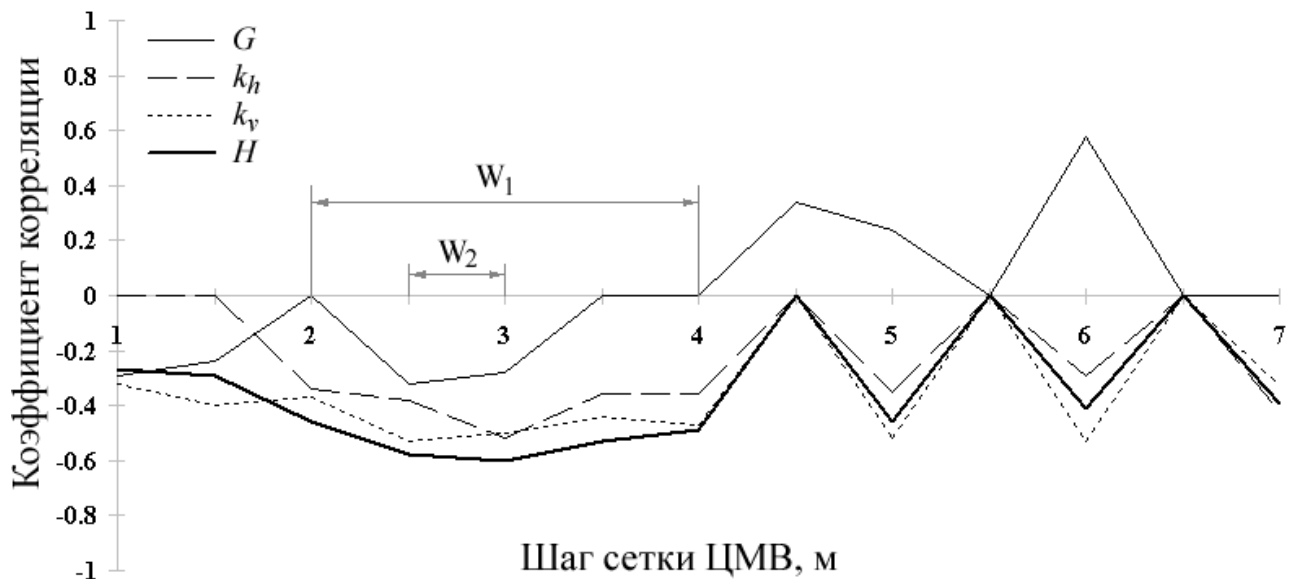


Рис. 5. Корреляция влажности поверхностного слоя почвы с локальными характеристиками рельефа в зависимости от  $w$

В разделе 3.3 описан разработанный автором способ анализа, моделирования и картографирования пространственного распределения характеристик почвы на основе цифрового моделирования рельефа, корреляционного анализа и множественного регрессионного анализа.

В почвоведении получило развитие предсказательное (прогнозное) картографирование почвенных свойств. Оно основано на следующем допущении. Пусть по относительно небольшой выборке измерений установлена зависимость некоторого почвенного свойства от морфометрических характеристик. Если статистическая связь между двумя наборами величин – почвенным свойством и морфометрическими факторами-предпосылками – достаточно тесна, то используя количественную информацию о рельефе можно предсказывать пространственное распределение характеристики почвы в пределах поля, ландшафта и, иногда, небольшого региона (Odeh et al., 1991; Boer et al., 1996; Cook et al., 1996; McKenzie, Ryan, 1999; Bishop, McBratney, 2001; McBratney et al., 2003; Scull et al., 2003; Козлов, Сорокина, 2007). Объектами предсказательного картографирования являются морфологические, физические, химические и биологические свойства почвы. Наибольшее развитие получили три родственных направления, применяющие аппарат цифрового моделирования рельефа:

геостатистические подходы (Odeh et al., 1994), сегментация ландшафта (Penock et al., 1987; MacMillan, Pettapiece, 1997) и множественный регрессионный анализ (Moore et al., 1993; Bell et al., 1994; Gessler et al., 1995). Главным минусом существующих подходов является использование крайне ограниченного набора морфометрических величин (обычно не более 3–5 параметров рельефа), что резко снижает возможности моделирования отношений «рельеф–почва». Кроме того, при применении сегментационных методов в ходе моделирования, как правило, происходит переход от количественных шкал ЦМР к категориальным шкалам количественных свойств почвы. Такое «обобщение» картографируемых почвенных свойств во многих случаях обедняет результирующую карту и не всегда удовлетворяет целям исследования.

Разработанный способ включает следующие этапы:

1) Составление ЦМВ некоторого участка (поля). При этом может использоваться ЦМВ, полученная с помощью кинематической GPS-съемки, лидарной аэросъемки или традиционных методов топографии.

2) Расчет по ЦМВ репрезентативного набора цифровых моделей характеристик рельефа. Рекомендуются набор включает высоту, четырнадцать локальных характеристик ( $G$ ,  $A$ ,  $k_h$ ,  $k_v$ ,  $H$ ,  $k_{min}$ ,  $k_{max}$  и др.), нелокальные ( $CA$  и др.) и комбинированные характеристики ( $TI$  и др.).

3) Выделение в пределах участка делянки, которая репрезентативна относительно всего участка (с точки зрения распределения значений морфометрических параметров). Проверка морфометрической репрезентативности делянки относительно участка (достоверность различия) проводится с помощью известных статистических методов сравнения двух распределений.

4) Отбор почвенных образцов на делянке (размер выборки – не менее 40). Лабораторные анализы отобранных образцов.

5) Корреляционный анализ (рассчитываются ранговые коэффициенты корреляции) и множественный регрессионный анализ характеристик почвы и рельефа для выборок на делянке. Получение регрессионных уравнений почвенных свойств, в которых предикторами являются характеристики рельефа.

6) Расчет карт характеристик почвы для всего участка на основе рег-

рессионных уравнений, полученных для делянки.

В разделе 3.4 описаны полевые исследования с использованием разработанного способа анализа, моделирования и картографирования характеристик почвы. Исследовались: а) временная изменчивость влияния рельефа на свойства почвы (на примере влажности почвы); б) изменчивость отношений «рельеф–почва» в зависимости от глубины почвенного слоя (на примере влажности почвы); и в) влияние рельефа на процессы денитрификации в различных условиях увлажнения почвы.

Работы проведены на двух участках на юге канадской провинции Манитоба. Размеры участка «Миниота» ( $50^{\circ}13'40''$  с.ш.,  $100^{\circ}51'20''$  з.д.) составляют  $809 \times 820$  м при амплитуде высот 6 м; размеры участка «Минедоса» ( $50^{\circ}14'43''$  с.ш.,  $99^{\circ}50'34''$  з.д.) –  $1680 \times 821$  м при амплитуде высот 13 м. ЦМВ были получены с помощью кинематической GPS-съемки. ЦМВ включают 4211 и 7193 точек для участков «Миниота» и «Минедоса», соответственно.

На участках были выбраны делянки для отбора почвенных образцов (рис. 6). На участке «Миниота» почвенные образцы отбирались в 210 точках с 4-х глубин: 0–0,3, 0,3–0,6, 0,6–0,9 и 0,9–1,2 м. Для каждой глубины 6 раз определялась влажность почвы: в начале мая, начале июля и конце августа 1997 и 1998 гг. На участке «Минедоса» почвенные образцы отбирались в 40 точках на глубине 10 см в июле 2000 и 2001 гг. Определялись: влажность почвы, плотность почвы, наиболее вероятное число микроорганизмов, содержание углерода микробной биомассы, ферментативная активность денитрификаторов, степень денитрификации, уровень дыхания микробного сообщества и поток  $N_2O$ .

По авторскому методу (разд. 2.1) были рассчитаны все рекомендуемые (разд. 3.3) морфометрические характеристики: с шагом 15 м для участка «Миниота» и с шагом 20 м для участка «Минедоса» (рис. 6).

Был проведен корреляционный и множественный регрессионный анализ между указанными характеристиками почвы и морфометрическими показателями. Между морфометрическими параметрами –  $z$ ,  $G$ ,  $A$ ,  $k_h$ ,  $k_v$ ,  $H$ ,  $k_{min}$ ,  $k_{max}$ ,  $CA$  и  $TI$  – и характеристиками почвы существуют значимые корреляции, абсолютные значения которых варьируют от 0,3 до 0,7 при уровне значимости 0,00.

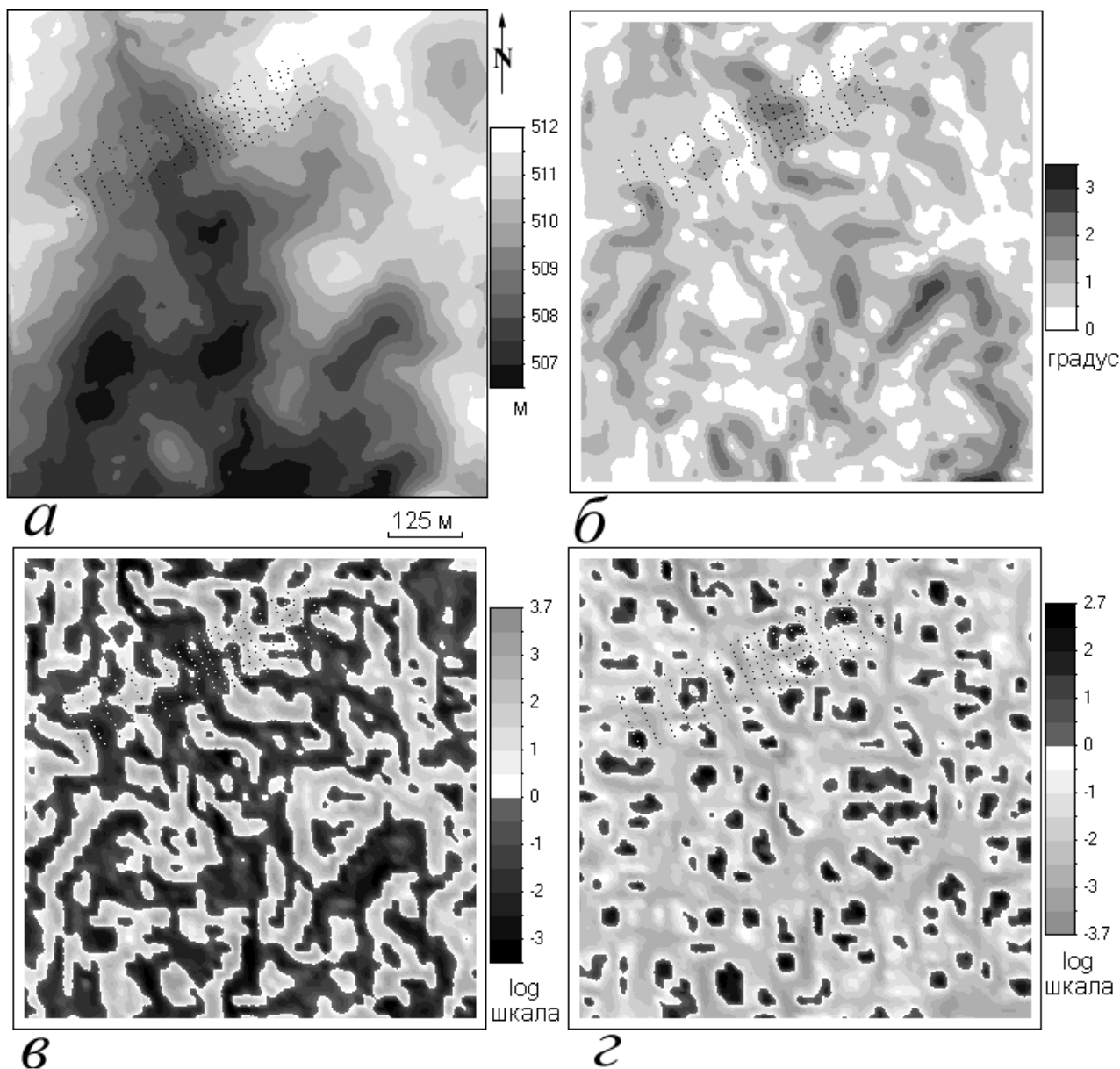


Рис. 6. Морфометрические карты участка «Миниота»: *а* – высота, *б* –  $G$ ,  
*в* –  $k_v$ , *г* –  $k_{min}$ . Точки – места отбора почвенных образцов

Наиболее высокие корреляции отмечены для  $G$ ,  $k_v$ ,  $H$  и  $CA$ . В результате множественного линейного регрессионного анализа получены уравнения, описывающие зависимость характеристик почвы от параметров рельефа.

Для участка «Миниота» полученные регрессионные уравнения объясняют до 49% пространственной вариабельности влажности почвы в верхнем 30-см слое. Для пахотного горизонта участка «Минедоса» регрессионные уравнения объясняют 46% вариабельности содержания углерода микробной биомассы. Так как в регрессионных уравнениях в качестве предикторов используются только морфометрические параметры, можно говорить, что характеристики

рельефа контролируют приведенные выше доли пространственной вариабельности указанных характеристик почвы.

Используя полученные регрессионные уравнения и цифровые модели морфометрических параметров (рис. 6), вошедшие в эти уравнения в качестве предикторов, были рассчитаны цифровые модели и карты указанных характеристик почвы (рис. 7). Цифровые модели почвенных свойств включают по 2743 точки для участка «Миниота» и по 3193 точки для участка «Минедоса». В зонах, где значения параметров-предикторов существенно отличается от диапазонов значений этих предикторов на делянке, моделирование и картографирование не проводилось (рис. 7). Полученные регрессионные уравнения могут быть с определенной осторожностью использованы для расчета карт почвенных свойств на участках с близкими геоморфологическими, гидрологическими и почвенными характеристиками.

В результате проведенных исследований для черноземовидных почв агроландшафтов бореальной зоны Северной Америки впервые установлен и количественно описан ряд закономерностей в системе «рельеф–почва»: 1) Пространственное распределение динамических свойств почвы зависит от рельефа при условии, что содержание влаги в почве превышает пороговый уровень; 2) Зави-

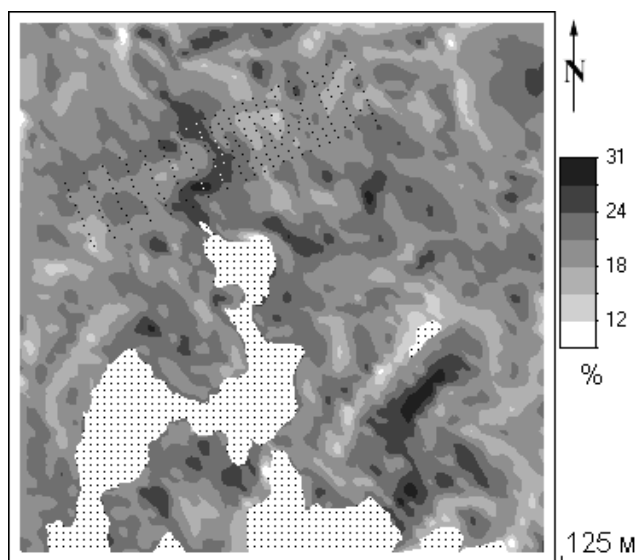


Рис. 7. Участок «Миниота», прогноз влажности почвы в верхнем 30-см слое.

Крап – зоны, для которых значения влажности не рассчитывались



симось динамических свойств почвы от рельефа уменьшается с глубиной, максимально проявляясь в верхних 30 см почвенного слоя; 3) Существует временная изменчивость зависимости пространственного распределения динамических свойств почвы от рельефа.

**Четвертая глава** посвящена использованию математико-картографического моделирования рельефа в геологических исследованиях.

ЦМВ и методы их анализа широко используются для выявления разрывных нарушений, индикаторами которых часто являются линеаменты. Однако применение известных методов моделирования рельефа не позволяет определять тип разрывного нарушения без дополнительного анализа геологических данных. В разделе 4.1 описан разработанный автором метод выявления и типизации выраженных в рельефе линеаментов на основе моделирования рельефа; при этом не требуется анализ дополнительной геологической информации.

Разработанный метод включает расчет по ЦМВ цифровых моделей  $k_h$  и  $k_v$  и их картографирование. Аргументировано, что линеаменты, регистрируемые на картах  $k_h$ , связаны с дислокациями, образованными преимущественно горизонтальными движениями (например, сдвигами). Линеаменты, фиксируемые на картах  $k_v$ , связаны со структурами, образованными, в основном, вертикальными движениями (сбросами, взбросами и надвигами). Линеаменты, регистрируемые на картах как  $k_h$ , так и  $k_v$ , связаны со сбросо-сдвигами и раздвигами.

Проведено тестирование метода с использованием ЦМВ абстрактного участка, на которой моделировались разломы различного типа, части Крымского полуострова и прилегающего морского дна и территории, прилегающей к Курской АЭС.

На ЦМВ абстрактного участка (60 × 60 м, 129 точек) моделировались: вертикальный сброс, пологий сброс, левый сдвиг, сбросо-сдвиг, надвиги и раздвиг. Полученные результаты по абстрактному участку, в целом, подтверждают правильность теоретической основы разработанного метода.

Для части Крымского полуострова (210 × 132 км) использовалась ЦМВ

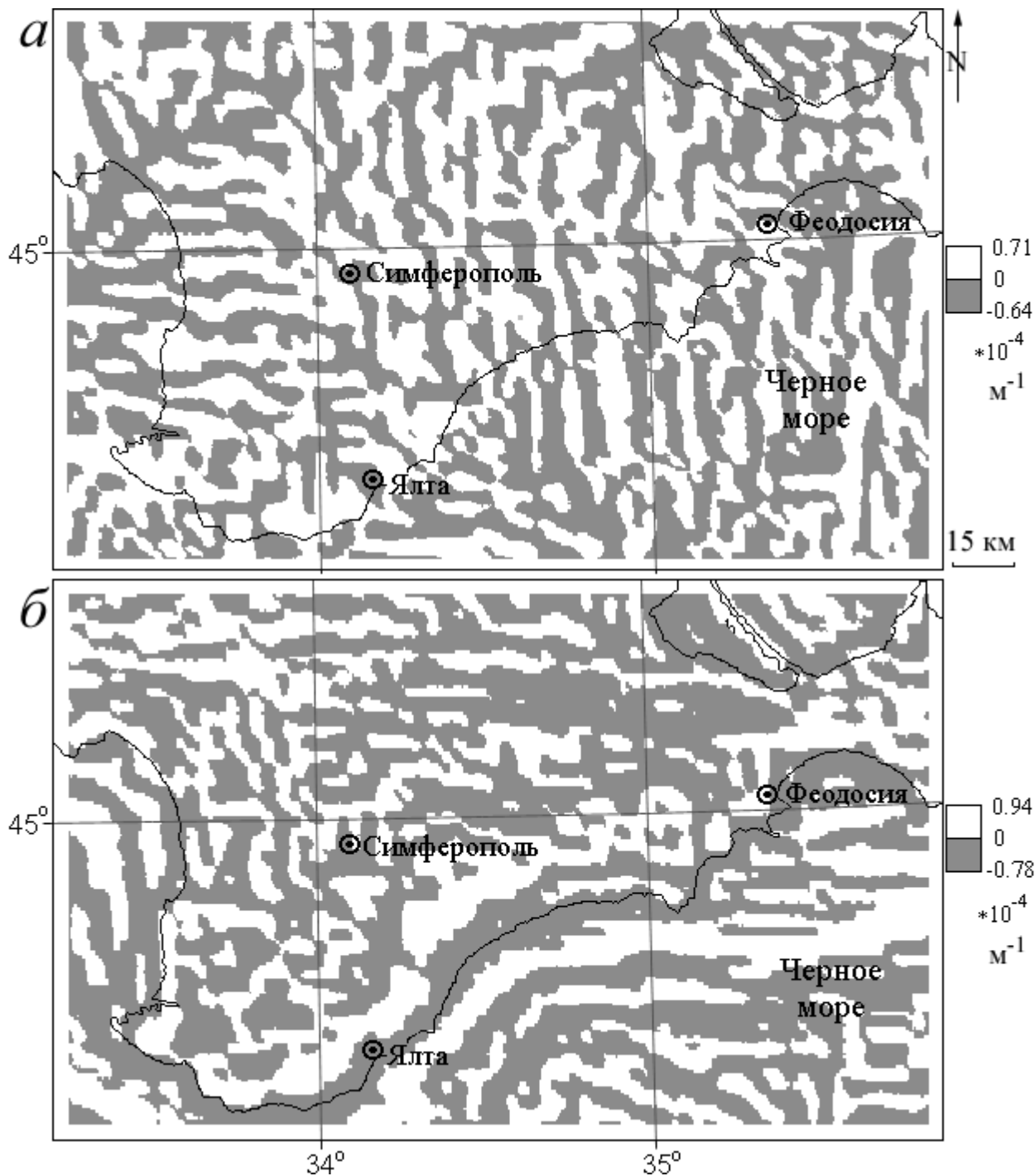


Рис. 8. Крымский полуостров и прилегающее морское дно:  
 сверху – горизонтальная кривизна, внизу – вертикальная кривизна

(11936 точек), составленная путем оцифровки горизонталей топографических карт масштабов 1 : 300 000 и 1 : 500 000. Модели  $k_h$  и  $k_v$  были рассчитаны по авторскому методу (разд. 2.1) с шагом 3000 м (рис. 8).

Для Крыма картографирование  $k_h$  (рис. 8) позволило выявить: а) систему субмеридиональных линеаментов на востоке и в центре территории; б) систему субширотных линеаментов на западе; в) ряд линейных структур северо-восточ-

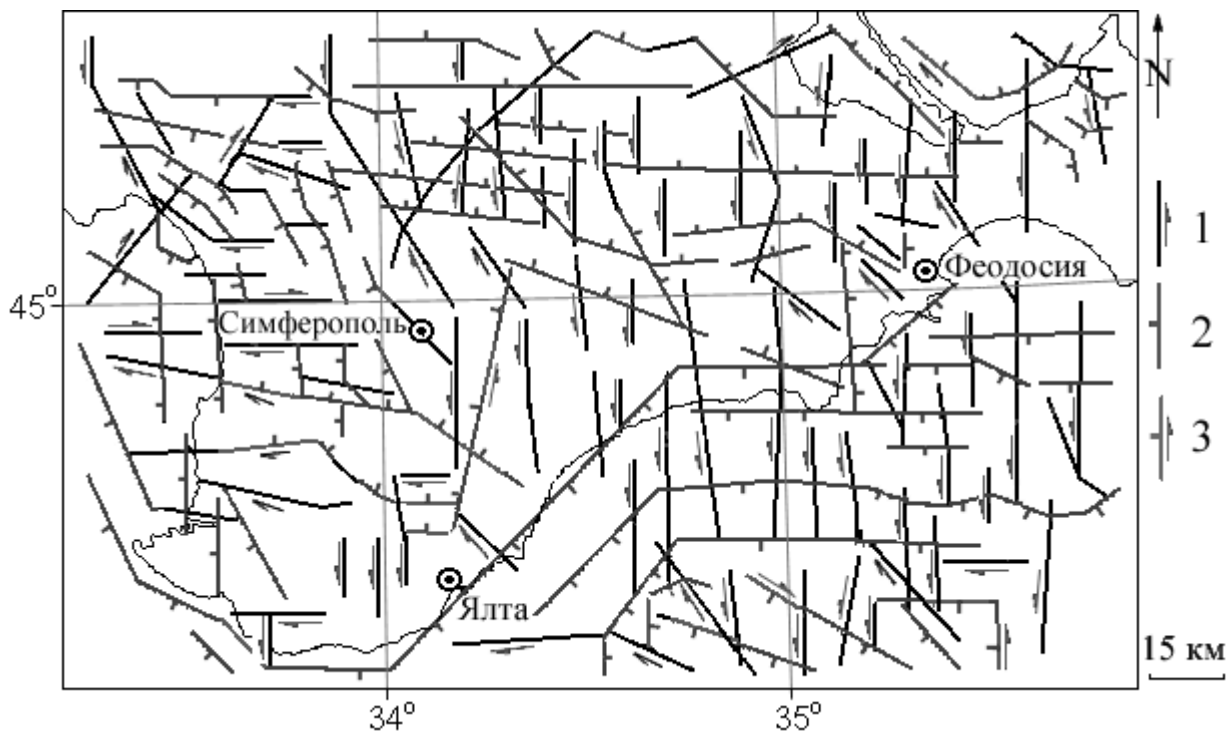


Рис. 9. Крымский полуостров и прилегающее морское дно: интерпретация выявленных линеаментов. Легенда: линеаменты связанные со сдвигами (1), сбросами и надвигами (2) и сбросо-сдвигами (3)

ного простирания на севере; и г) ряд линеаментов северо-западного азимута на юге. Эти структуры связываются нами со сдвигами (рис. 9).

Картографирование  $k_v$  (рис. 8) позволило выявить: а) систему субширотных линеаментов на востоке, севере и в центре участка; б) систему субмеридиональных линеаментов на западе; в) ряд линейных структур северо-западного простирания на юге и севере. Эти линеаменты связываются нами со сбросами и надвигами (рис. 9). Линеаменты, одновременно фиксируемые на картах  $k_h$  и  $k_v$  нами связываются со сбросо-сдвигами.

Карта выявленных линеаментов (рис. 9) отражает сложное пространственное распределение этих структур. Линеаменты различного происхождения объединяются, как правило, в системы. Линеаменты, связанные со сбросами, проходят, в основном, вкост линеаментам, связанным со сдвигами. Фиксируются линеаменты, фрагменты которых связываются нами с разрывами различной морфологии: сбросами, сдвигами, надвигами и сбросо-сдвигами. Система субмеридиональных линеаментов, связанных со сдвигами, трассирует-

ся через районы различного геологического происхождения.

Сравнительный анализ полученной карты линеаментов (рис. 9) и опубликованных карт разрывных нарушений, составленных по геолого-геофизическим данным (Чекунов и др., 1965; Лебедев, Оровецкий, 1966), показал, что часть выявленных линеаментов индицируют зоны известных глубинных трансрегиональных разломов.

Большинство выявленных линеаментов соответствуют основным группам известных региональных разломов. Система субмеридиональных линеаментов, связанных с нашей точки зрения со сдвигами (рис. 9), соотносится с системой левых сбросо-сдвигов с преобладанием горизонтальной составляющей (Расцветаев, 1977). Линеаменты северо-западного простирания, которые связываются нами со сдвигами, сбросами и сбросо-сдвигами (рис. 9), соотносятся с известными группами таких разломов (Расцветаев, 1977; Борисенко, 1986).

Для района Курской АЭС ( $68 \times 48$  км) анализировались 4 ЦМВ – земной поверхности и кровли трех стратиграфических горизонтов (сеноманского яруса, меловой системы и кристаллического фундамента). Исходные нерегулярные ЦМВ содержат 46694, 941, 1002 и 1308 точек, соответственно. ЦМВ получены путем оцифровки топографической карты и фондовых геолого-геофизических картографических материалов масштаба 1 : 200 000. Модели  $k_h$  и  $k_v$  были рассчитаны по всем ЦМВ по авторскому методу (разд. 2.1) с шагом 1500 м. Так как рассматривается платформенная территория, выявленные линеаменты были интерпретированы нами как зоны концентрации изгибных деформаций.

Линеаменты, которые связываются нами с зонами изгибных сдвиговых деформаций, выявлены на всех горизонтах. На кровле кристаллического фундамента они имеют преимущественно субмеридиональное простирание; на кровле сеноманского яруса и меловой системы – генеральный северо-восточный азимут; а на дневной поверхности – преимущественно субмеридиональное простирание. Линеаменты, связанные с флексурами, на всех горизонтах развиты преимущественно вкост линеаментам, связанным с изгибными сдвиговыми деформациями. Полученные результаты, в целом, согласуются с выводами А.И.Полетаева с соавт. (1992), использовавших при изучении разрывно-лине-

аментной структуры этого района топографические карты и космические снимки.

Результаты моделирования по Крыму и Курской обл. свидетельствуют о том, что разработанный метод эффективен в различных геоморфологических и тектонических ситуациях.

В разделе 4.2 изучены соотношения между зонами относительной аккумуляции потоков и узловыми структурами (участки пересечения линеаментов).

На разных масштабных уровнях латеральный массоперенос, во многом, зависит от пространственного распределения элементов рельефа, которые можно разделить на три категории: 1) Зоны относительной аккумуляции (одновременная конвергенция и относительное замедление потоков;  $k_h < 0$  при  $k_v < 0$ ); 2) Зоны сноса (одновременная дивергенция и относительное ускорение потоков;  $k_h > 0$  при  $k_v > 0$ ); 3) Зоны транзита (отсутствие одновременного действия «однонаправленных» процессов).

Доказано, что для территорий с тектоническим унаследованным рельефом зоны аккумуляции поверхностных потоков, как правило, совпадают с узлами пересечения линеаментов. Действительно, для выделения выраженных в рельефе линеаментов необходимо получить карты  $k_h$  и  $k_v$  (разд. 4.1). При этом выделяются две группы структур. Линеаменты первой группы фиксируются фрагментами областей конвергенции ( $k_h < 0$ ). Линеаменты второй группы регистрируются фрагментами областей относительного замедления ( $k_v < 0$ ). Пересечение линеаментов из разных групп соответствует зоне аккумуляции.

На примере Крыма проведен анализ распределения по зонам аккумуляции, транзита и сноса природных объектов, которые априори могут располагаться в узловых структурах. Для расчета  $k_h$  и  $k_v$  по авторскому методу (разд. 2.1) с шагом 3000 м использовалась ЦМВ Крыма, рассмотренная в разд. 4.1. На основе моделей  $k_h$  и  $k_v$  была построена карта зон аккумуляции, транзита и сноса (рис. 10). Использовалась следующая выборка природных объектов: 24 сильно обводненные зоны – участки с аномально высокими дебитами источников и скважин (Морозов и др., 1988); 29 участков интенсивной и 25 участков исключительно интенсивной трещинной проницаемости горных пород, выявленных с

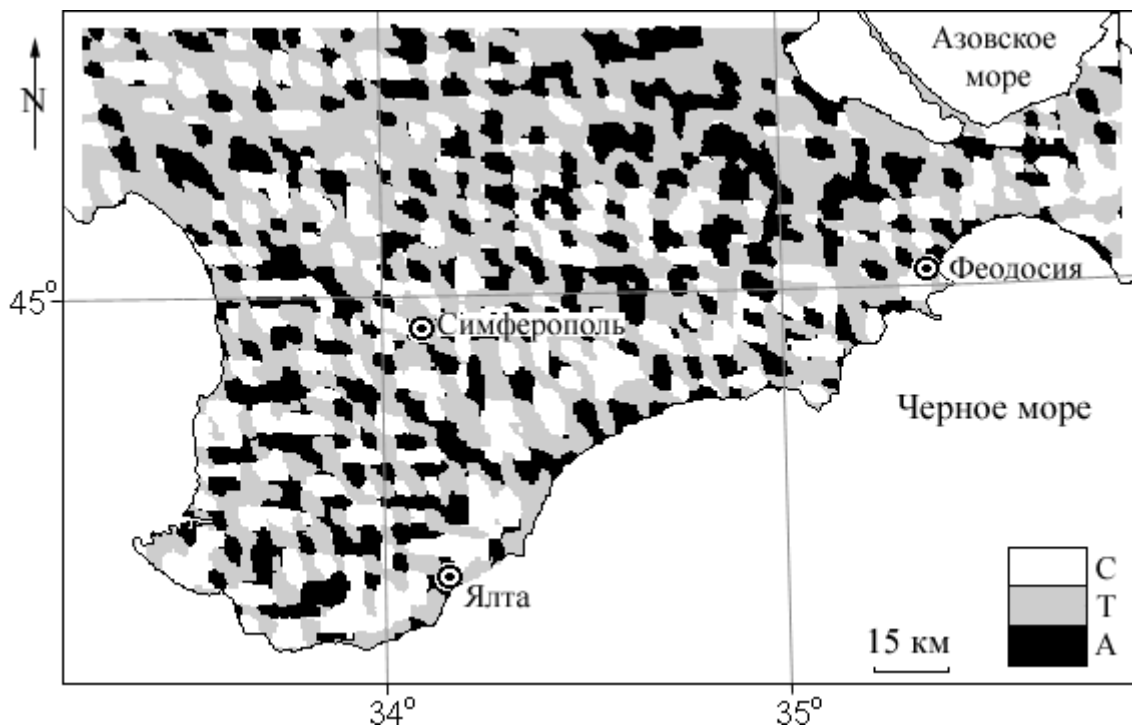


Рис. 10. Крым: зоны сноса (С), транзита (Т) и аккумуляции (А)

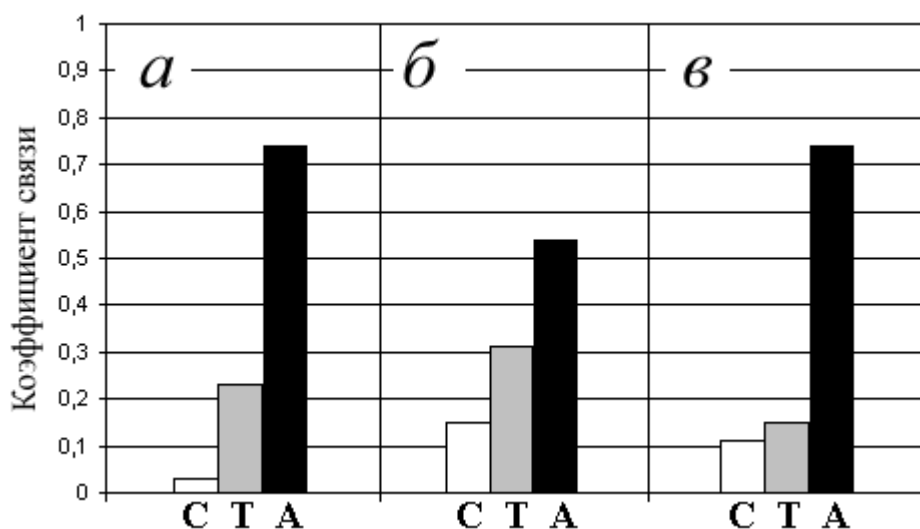


Рис. 11. Распределение по зонам сноса (С), транзита (Т) и аккумуляции (А):  
*а* – сильно обводненные зоны, *б* – участки интенсивной и *в* – исключительно интенсивной трещиноватости пород

помощью  $\gamma$ -метрического метода (Штенгелов, 1978, 1980; Коробейник и др., 1982).

Для этих природных объектов найдена высокая степень приуроченности к зонам относительной аккумуляции (рис. 11). Показано, что гидроморфизм почв

и грунтов в зонах относительной аккумуляции определяется как накоплением поверхностной и приповерхностной влаги (за счет латерального приповерхностного массопереноса), так и восходящей миграцией вод глубинных горизонтов. Аргументировано, что выраженные в рельефе зоны аккумуляции являются участками контакта поверхностных латеральных потоков воды и растворенных в ней веществ с глубинными восходящими потоками подземных вод.

В разделе 4.3 рассмотрены возможности сфероидического цифрового моделирования рельефа для выявления и анализа линейных тектонических структур, выраженных в глобальном рельефе.

Выявлению и анализу планетарных систем линеаментов уделялось много внимания в работах, посвященных глобальному тектоническому моделированию (Долицкий, Кийко, 1963; Чебаненко, 1963; Knetsch, 1965; Moody, 1966; Чердниченко и др., 1966; O'Driscoll, 1980; Беспрозванный и др., 1994; Волков, 1995). H.Rance (1967, 1968) разработал физико-математическую модель торсионных деформаций вращающейся сферы. Согласно этой модели, при вращении на поверхности сферы образуются две группы следов поверхностей разрушения: трещины транспрессии и трещины кливажа. Они представляют собой две системы двойных пространственных спиралей, проходящих по поверхности сферы от полюса до полюса. Пара взаимно симметричных спиралевидных следов трещин транспрессии имеет углы наклона на экваторе  $15-18^\circ$  и  $165-162^\circ$ , а пара взаимно симметричных спиралевидных следов трещин кливажа –  $56-62^\circ$  и  $124-118^\circ$ .

Перед автором стояла задача провести моделирование рельефа Земли на планетарном масштабном уровне для выявления глобальных спиралевидных структур с целью подтверждения или опровержения указанной гипотезы. Кроме того, требовалось провести аналогичный анализ рельефа планет земной группы и спутников для сравнительного планетологического анализа, результаты которого могли бы служить дополнительными аргументами за или против гипотезы существования глобальных спиралевидных тектонических структур на Земле.

Для работы была составлена глобальная ЦМВ Земли на основе ЦМВ

GLOBE и ETOPO2. Использовались глобальные ЦМВ Марса (по данным лазерной альтиметрии; архив миссии Mars Global Surveyor), Венеры (по данным спутниковой радиолокационной съемки; архив миссии Magellan) и Луны (по данным лазерной альтиметрии; архив миссии Clementine). Все ЦМВ построены на сетке сфероидических трапеций с шагом  $30'$  и включают по 260281 точке.

С помощью авторского метода расчета морфометрических характеристик на сетке сфероидических трапеций (разд. 2.2) для Земли, Марса, Венеры и Луны впервые получены глобальные модели и карты  $k_h$ ,  $k_v$  (рис. 12),  $H$ ,  $K$ ,  $k_{min}$ ,  $k_{max}$  и др. Все глобальные ЦМВ обрабатывались как виртуально замкнутые матрицы высот. Были построены «бинарные» карты  $CA$  – при квантовании значений  $CA$  на два уровня (рис. 13).

Анализ бинарных карт  $CA$  Земли позволил выявить пять взаимно симметричных пар глобальных линеаментов – двойных спиралевидных структур (рис. 14). Аналогичный анализ позволил выявить ряд глобальных линеаментов на поверхности Марса и Венеры. Выявленные структуры представляют собой зоны многокилометровой ширины, пересекающие районы с различным геологическим строением.

Сравнительный анализ теоретических углов наклона следов торсионных деформаций и углов наклона выявленных нами двойных спиралей (рис. 14) показал, что Кавказско-Клиппертонская и Бискайско-Санта Крузская структуры могут быть отнесены к следам трещин транспрессии, а Дакарская и Палаванская – к следам трещин кливажа. Среднее отклонение углов наклона этих структур на экваторе от теоретических значений составляет  $2,8^\circ$ .

Таким образом, из пяти выявленных двойных спиралевидных структур, четыре имеют углы наклона, близкие к теоретическим значениям углов наклона следов торсионных деформаций сферы. Это дает нам право рассматривать выявленные спиралевидные структуры Земли как проявление глобальных торсионных напряжений и деформаций. Они могут быть вызваны неравномерностью вращения оболочек реологически и вещественно неоднородного сфероида Земли. Так как спиралевидные структуры выражены в современном рельефе, время их возникновения можно датировать кайнозоем.



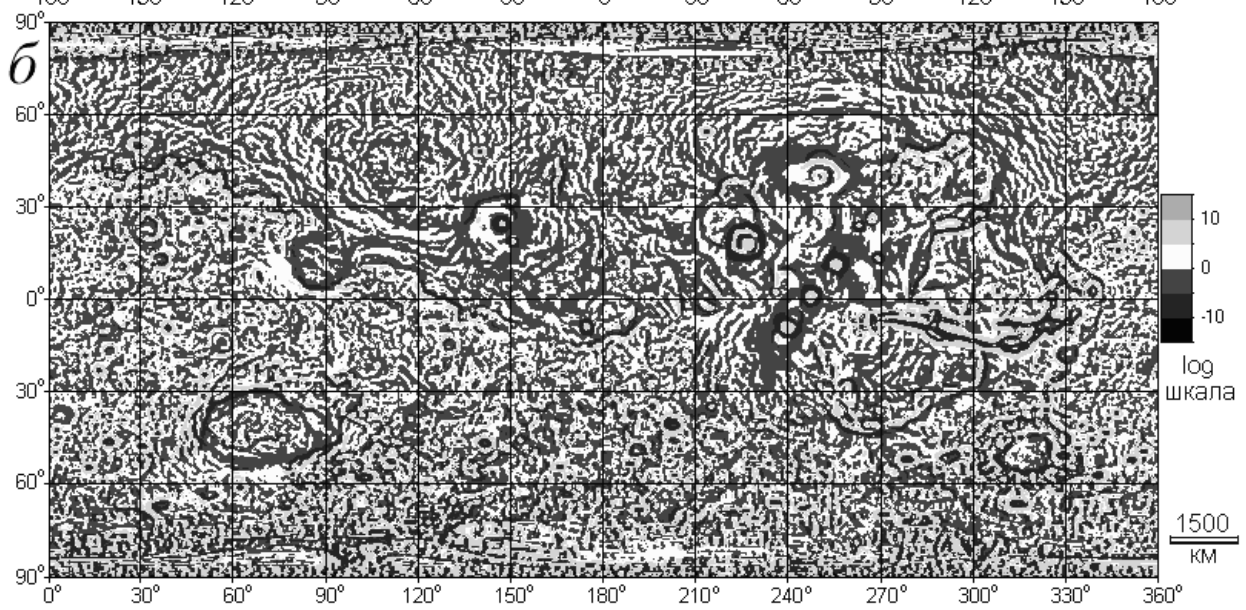
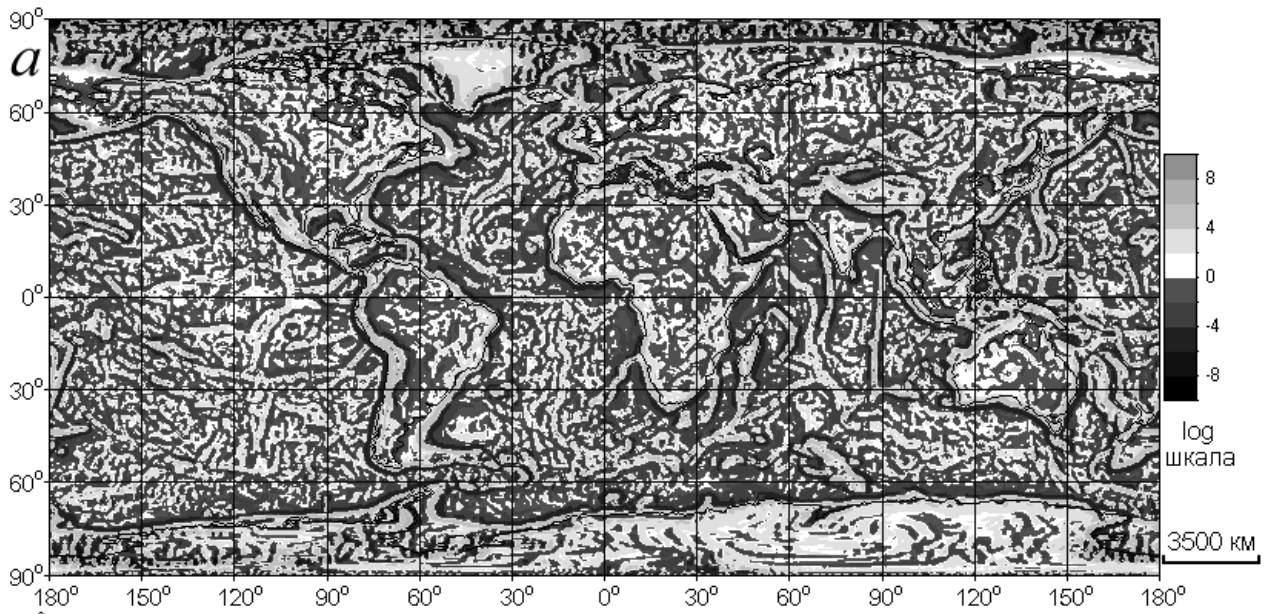


Рис. 12. Глобальные карты вертикальной кривизны: *а* – Земля, *б* – Марс

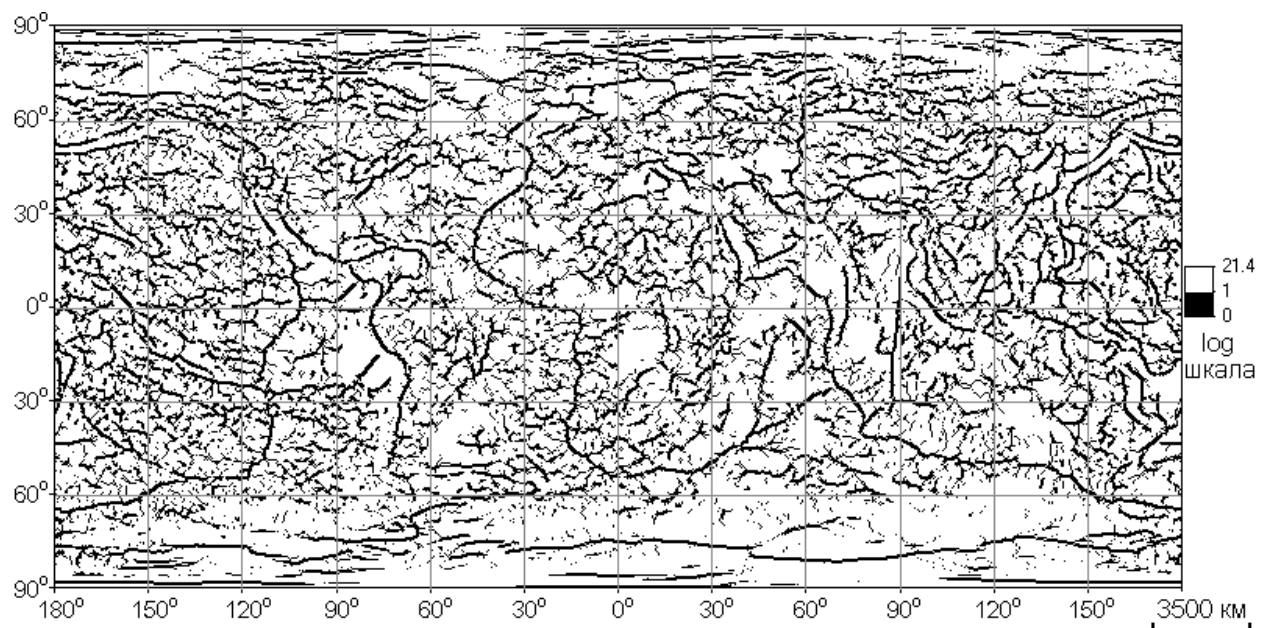


Рис. 13. Земля, глобальная бинарная карта удельной водосборной площади

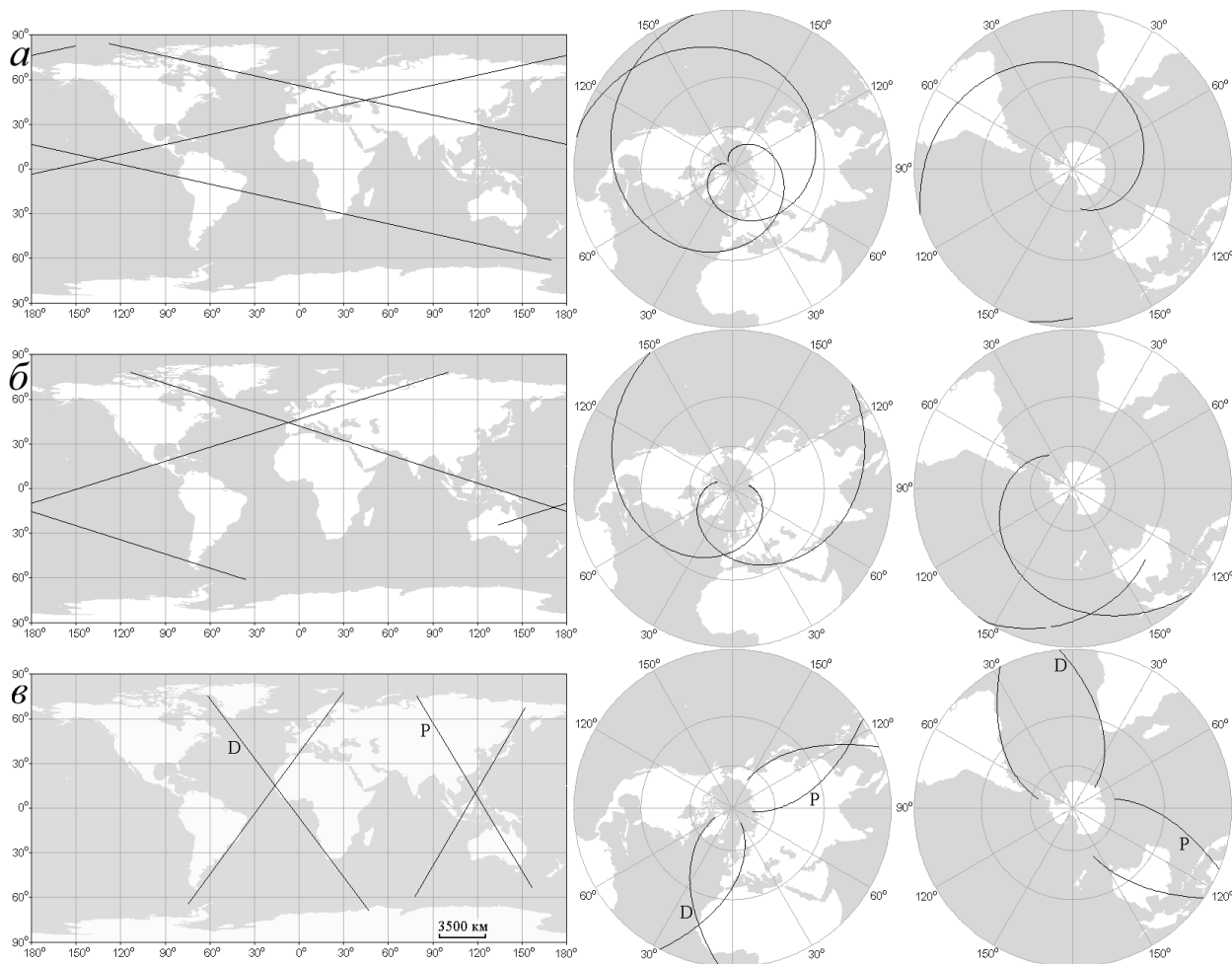


Рис. 14. Двойные спиралевидные структуры Земли (в трех проекциях):  
*а* – Кавказско-Клиппертонская, *б* – Бискайско-Санта-Крузская,  
*в* – Дакарская (D) и Палаванская (P)

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы.

**В приложении** дана краткая характеристика разработанного программного обеспечения LandLord для моделирования рельефа.

## ВЫВОДЫ

1. Теоретически обоснована и разработана система методов математико-картографического моделирования рельефа для почвенных и геологических исследований.

2. Разработаны два вычислительных метода, основанные на аппроксимации частных производных высоты конечными разностями, позволяющие рассчитывать цифровые модели локальных морфометрических характеристик

по ЦМВ, заданным на квадратной сетке и сетке сфероидических трапеций:

– Метод расчета морфометрических характеристик на квадратной сетке обладает наивысшей точностью среди аналогов; предназначен для почвенных исследований в диапазоне масштабов «делянка – поле – ландшафт», а также для региональных геологических исследований.

– Метод расчета морфометрических характеристик на сетке сфероидических трапеций аналогов не имеет; предназначен для геологических исследований регионального, континентального и глобального масштаба, а также для региональных почвенных исследований.

3. Разработан вычислительный метод для оценки точности расчета цифровых моделей локальных морфометрических характеристик по критерию средней квадратической ошибки функции измеренных величин. Метод позволяет строить карты средних квадратических ошибок расчета этих характеристик на квадратной сетке и сетке сфероидических трапеций.

4. Разработан метод определения компетентного разрешения ЦМР для почвенных исследований. В основе метода лежит концепция репрезентативного элементарного объема и графическое представление коэффициентов корреляции между характеристиками почвы и рельефа в зависимости от шага сетки ЦМР.

5. Разработан способ анализа, моделирования и картографирования пространственного распределения свойств почвы на основе цифрового моделирования рельефа, корреляционного анализа и множественного регрессионного анализа, в котором предикторами являются морфометрические характеристики. Способ позволяет рассчитывать карты свойств почвы на масштабном уровне поля по данным, полученным на делянке.

6. Разработан метод выявления и типизации выраженных в рельефе линеаментов. Метод включает картографирование  $k_h$  и  $k_v$ . Линеаменты, регистрируемые на картах  $k_h$ , связаны с дислокациями, образованными преимущественно горизонтальными движениями. Линеаменты, фиксируемые на картах  $k_v$ , связаны со структурами, образованными, в основном, вертикальными смещениями. Линеаменты, регистрируемые на картах как  $k_h$ , так и  $k_v$ , связаны со сбросо-

сдвигами и раздвигами.

7. Разработанные методы систематически применялись автором в почвенных и геологических исследованиях: для анализа, моделирования и картографирования свойств почвы на масштабных уровнях «делянка – поле»; для изучения геологического строения сейсмоактивных регионов и территорий, прилегающих к объектам повышенного риска; а также для анализа глобального рельефа и тектоники Земли и других небесных тел. Результаты этих работ показали высокую эффективность разработанных методов. В частности, был получен ряд фундаментальных результатов, которые невозможно было получить при использовании иных подходов:

– Для черноземовидных почв агроландшафтов бореальной зоны Северной Америки впервые установлены и количественно описаны следующие закономерности: 1) Пространственное распределение динамических свойств почвы зависит от характеристик рельефа лишь в том случае, если содержание влаги в почве превышает некоторый пороговый уровень. 2) Зависимость пространственного распределения динамических свойств почвы от характеристик рельефа уменьшается с глубиной, максимально проявляясь в верхних 30 см почвенного слоя. 3) Существует временная изменчивость зависимости пространственного распределения динамических почвенных свойств от характеристик рельефа.

– Для территорий с тектоническим унаследованным рельефом впервые на количественном уровне доказано, что зоны аккумуляции поверхностных потоков, как правило, совпадают с узлами пересечения линеаментов. Выраженные в рельефе зоны аккумуляции являются участками контакта и вещественного обмена приповерхностных латеральных потоков воды и растворенных в ней веществ с глубинными восходящими потоками подземных вод.

– Впервые с использованием количественных данных и численных методов подтверждена гипотеза существования на Земле двойных спиралевидных структур планетарного ранга, выраженных в рельефе и, вероятно, связанных с ротационными напряжениями земной коры.

8. Создана программа LandLord, реализующая разработанную систему методов математико-картографического моделирования рельефа.

9. Разработанные методы расширяют возможности применения математико-картографического моделирования рельефа в почвоведении и геологии. В частности, разработанные вычислительные методы могут применяться для обработки ЦМВ, полученных любым способом. Они позволяют рассчитывать ЦМР на двух основных типах регулярных сеток с любым линейным или угловым разрешением. Это позволяет моделировать и анализировать рельеф любого уровня иерархии при решении задач почвоведения и геологии любого масштабного уровня.

10. Разработанные методы могут применяться при инженерных изысканиях, проектировании, строительстве, трассировании линейных сооружений различного типа, мелиоративном строительстве, проектировании, строительстве и мониторинге объектов повышенного риска.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### *Монографии:*

1. Чистов С.В., **Флоринский И.В.** Экологическая картография. – М.: РЭФИА. – 1997. – 133 с.

### *Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:*

2. **Флоринский И.В.** Международный опыт использования цифровых моделей рельефа при автоматизированном анализе данных дистанционного зондирования // Геодезия и картография. – 1995. – № 12. – С. 33-38.
3. **Флоринский И.В.** Узлы пересечения разломов и зоны аккумуляции потоков: анализ соотношений // Известия Академии Наук, Сер. Географическая. – 2001. – № 6. – С. 83-95.
4. **Флоринский И.В.** Мелкомасштабные морфометрические карты Северной Евразии // Геодезия и картография. – 2007. – № 2. – С. 15-21.
5. **Флоринский И.В.** Морфометрические карты мира // Геодезия и картография. – 2008. – № 1. – С. 24-27.
6. **Флоринский И.В.** Карты зон относительной аккумуляции для целей поис-

- ковой и инженерной геологии // Геодезия и картография. – 2008. – № 3. – С. 23-29.
7. **Флоринский И.В.** О точности вычислений в цифровом моделировании рельефа // Геодезия и картография. – 2008. – № 6. – С. 28-32.
  8. **Флоринский И.В.** К 100-летию Тунгусского феномена. Цифровое моделирование рельефа в районе эпицентра // Геодезия и картография. – 2008. – № 8. – С. 20-22.
  9. **Флоринский И.В.** Расчет производящей функции высоты для выделения структурных линий рельефа по спутниковым данным и топографическим картам // Исследование Земли из космоса. – 2008. – № 6, С. 43-51.
  10. **Флоринский И.В.** Анализ планетарного рельефа Марса, Венеры и Луны по данным миссий Mars Global Surveyor, Magellan и Clementine // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 5. – С. 32-48.
  11. **Флоринский И.В.** Картографирование почвы на основе цифрового моделирования рельефа (по данным кинематических GPS-съемок и почвенных наземных съемок) // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 6. – С. 56-65.
  12. **Флоринский И.В.** Точный метод расчета локальных характеристик рельефа // Геодезия и картография. – 2009. – № 4. – С. 19-23.
  13. **Florinsky I.V.** Quantitative topographic method of fault morphology recognition // *Geomorphology*. – 1996. – Vol. 16. – № 2. – P. 103-119.
  14. **Florinsky I.V.** Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models // *International Journal of Geographical Information Science*. – 1998. – Vol. 12. – № 1. – P. 47-61.
  15. **Florinsky I.V.** Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations // *Progress in Physical Geography*. – 1998. – Vol. 22. – № 1. – P. 33-60.
  16. **Florinsky I.V.** Derivation of topographic variables from a digital elevation model given by a spheroidal trapezoidal grid // *International Journal of Geographical Information Science*. – 1998. – Vol. 12. – № 8. – P. 829-852.
  17. **Florinsky I.V.** Relationships between topographically expressed zones of flow

- accumulation and sites of fault intersection: analysis by means of digital terrain modelling // *Environmental Modelling and Software*. – 2000. – Vol. 15. – № 1. – P. 87-100.
18. **Florinsky I.V.** Errors of signal processing in digital terrain modelling // *International Journal of Geographical Information Science*. – 2002. – Vol. 16. – № 5. – P. 475-501.
19. **Florinsky I.V.** Artificial lineaments in digital terrain modelling: can operators of topographic variables cause them? // *Mathematical Geology*. – 2005. – Vol. 37. – № 4. – P. 357-372.
20. **Florinsky I.V.** Computation of the third-order partial derivatives from a digital elevation model // *International Journal of Geographical Information Science*. – 2009. – Vol. 23. – № 2. – P. 213-231.
21. Кулагина Т.Б., Мешалкина Ю.Л., **Флоринский И.В.** Влияние рельефа на распределение радиационной температуры ландшафта // *Исследование Земли из космоса*. – 1994. – № 3. – С. 108-115.
22. **Флоринский И.В.**, Грохлина Т.И., Михайлова Н.Л. LANDLORD 2.0: система анализа и картографирования геометрических характеристик рельефа // *Геодезия и картография*. – 1995. – № 5. – С. 46-51.
23. Голяндина Н.Э., Усевич К.Д., **Флоринский И.В.** Анализ сингулярного спектра для фильтрации цифровых моделей рельефа // *Геодезия и картография*. – 2008. – № 5. – С. 21-28.
24. **Флоринский И.В.**, Айлерс Р.Дж., Бёртон Д.Л., Мак-Магон Ш.К., Монреал К.М., Фаренхорст А. Прогнозное почвенное картографирование на основе цифрового моделирования рельефа // *Геоинформатика*. – 2009. – № 1. – С. 22-32.
25. **Florinsky I.V.**, Kulagina T.B., Meshalkina J.L. Influence of topography on landscape radiation temperature distribution // *International Journal of Remote Sensing*. – 1994. – Vol. 15. – № 16. – P. 3147-3153.
26. **Florinsky I.V.**, Kuryakova G.A. Influence of topography on some vegetation cover properties // *Catena*. – 1996. – Vol. 27. – № 2. – P. 123-141.
27. **Florinsky I.V.**, Arlashina H.A. Quantitative topographic analysis of gilgai soil

morphology // *Geoderma*. – 1998. – Vol. 82. – № 4. – P. 359-380.

28. **Florinsky I.V.**, Eilers R.G., Lelyk G.W. Prediction of soil salinity risk by digital terrain modelling in the Canadian prairies // *Canadian Journal of Soil Science*. – 2000. – Vol. 80. – № 3. – P. 455-463.
29. **Florinsky I.V.**, Kuryakova G.A. Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations – exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale // *International Journal of Geographical Information Science*. – 2000. – Vol. 14. – № 8. – P. 815-832.
30. **Florinsky I.V.**, Eilers R.G., Manning G., Fuller L.G. Prediction of soil properties by digital terrain modelling // *Environmental Modelling and Software*. – 2002. – Vol. 17. – № 3. – P. 295-311.
31. Farenhorst A., **Florinsky I.V.**, Monreal C.M., Muc D. Evaluating the use of digital terrain modelling for quantifying the spatial variability of 2,4-D sorption by soil within agricultural landscapes // *Canadian Journal of Soil Science*. – 2003. – Vol. 83. – № 5. – P. 557-563.
32. **Florinsky I.V.**, McMahon S., Burton D.L. Topographic control of soil microbial activity: a case study of denitrifiers // *Geoderma*. – 2004. – Vol. 119. – № 1-2. – P. 33-53.

*Другие публикации:*

33. **Florinsky I.V.** Editorial // *International Journal of Ecology and Development*. – 2007. – Vol. 8. – № F07. – P. 5-7.
34. **Florinsky I.V.** Solving three problems of exploration and engineering geology by digital terrain analysis // *International Journal of Ecology and Development*. – 2007. – Vol. 8. – № F07. – P. 52-65.
35. **Florinsky I.V.** Global lineaments: application of digital terrain modelling // *Advances in Digital Terrain Analysis (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography)*. – Berlin: Springer. – 2008. – P. 365-382.
36. **Florinsky I.V.** Global morphometric maps of Mars, Venus, and the Moon // *Geospatial Vision: New Dimensions in Cartography (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography)*. – Berlin: Springer. – 2008. – P. 171-192.



37. Шарый П.А., Курякова Г.А., **Флоринский И.В.** О международном опыте применения методов топографии в ландшафтных исследованиях (краткий обзор) // Геометрия структур земной поверхности. – Пущино: ПНЦ АН СССР. – 1991. – С. 15-29.
38. **Florinsky I.V.**, Eilers R.G., Lelyk G.W. Prediction of soil salinity risk by digital terrain modelling in the Canadian prairies // *Managing for Healthy Ecosystems*. – Boca Raton: Lewis Publishers. – 2003. – P. 1221-1228.
39. Golyandina N.E., Usevich K.D., **Florinsky I.V.** Filtering of digital terrain models by two-dimensional singular spectrum analysis // *International Journal of Ecology and Development*. – 2007. – Vol. 8. – № F07. – P. 81-94.
40. **Florinsky I.V.**, McMahon S., Burton D.L. Topographic factors of nitrous oxide emission // *Nitrous Oxide Emissions Research Progress*. – N.Y.: Nova Science Publishers. – 2009. – P. 105-126.
41. **Флоринский И.В.** Генерализация в картографии: краткий обзор проблемы / Препр. – Пущино: ПНЦ АН СССР. – 1991. – 55 с.
42. **Флоринский И.В.** Визуализация линеаментов и структур центрального типа: количественные топографические подходы / Препр. – Пущино: ПНЦ РАН. – 1992. – 47 с.
43. **Florinsky I.V.** Fault morphology recognition by digital elevation model processing // *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 1996. – Vol. 31. – Part B4. – Commission IV. – P. 252-257.
44. **Florinsky I.V.** Errors caused by some transformations of digital elevation models // *Accuracy 2000: Proc. 4<sup>th</sup> Int. Sym. Spatial Accuracy Assessment in Natural Resource and Environmental Sciences*, Amsterdam, Netherlands, July 2000. – Philadelphia: Coronet Books. – 2000. – P. 207-212.
45. **Florinsky I.V.** Analytical test for isotropy of local topographic variables // *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Geographic Information Science (GIScience 2002)*, Boulder, USA, 25-28 Sept. 2002. – Oakland: Univ. California. – 2002. – P. 245-248.
46. **Florinsky I.V.** Global lineaments and ring structures: application of digital terrain modelling // *Full Papers, Proc. Int. Symp. Terrain Analysis and Digital Terrain Modelling (TADTM 2006)*, 23-25 Nov. 2006, Nanjing, China. – Nanjing:

Nanjing Normal Univ., 2006. – 17 p. (CD-ROM).

47. **Florinsky I.V.**, Kuryakova G.A. Determination of grid size for digital terrain models in soil investigations // Proc. 16<sup>th</sup> World Congr. Soil Science, Symposia 17, Montpellier, France, 20-26 Aug. 1998. – Montpellier: ISSS. – 1998. – P. 1-7 (CD ROM).
48. **Florinsky I.V.**, Eilers R.G., Manning G., Fuller L.G. Application of digital terrain modelling to prediction of soil properties in the Prairie Ecozone // Papers, 42<sup>nd</sup> Annual Manitoba Society of Soil Science Meeting, Winnipeg, Canada, 2-3 Feb., 1999. – Winnipeg: MSSS. – 1999. – P. 140-154.
49. **Florinsky I.V.**, Eilers R.G. Prediction of the soil carbon content at micro-, meso- and macroscales by digital terrain modelling // Trans. 17<sup>th</sup> World Congr. Soil Science, Symposium 52, Bangkok, Thailand, 14-21 Aug. 2002. – Bangkok: ISSS. – 2002. – P. 24.1-24.9 (CD ROM).
50. **Флоринский И.В.** Масштабный ряд «регион – платформа – континент – планета»: цифровое моделирование рельефа // Бюл. МОИП, Отд. Геол. – 2006. – Т. 81. – Вып. 5. – С. 83-84.
51. **Florinsky I.V.** Flow denudation, transit and accumulation zones of the part of the Crimean Peninsula and adjacent sea bottom // Математические методы распознавания образов. Тез. докл. 7 конф. Пушино, 25-30 сент. 1995. – М.: ВЦ РАН, 1995. – С. 166-168.
52. **Florinsky I.V.**, Arlashina E.A., Kovda I.V., Morgun Y.G. Topographic control of gilgai soil profile formation // Trans. 15<sup>th</sup> World Congr. Soil Science. Acapulco, Mexico, July 1994. Vol. 6b. – Mexico: ISSS, 1994. – P. 121-122.
53. Кuryakova Г.А., **Флоринский И.В.**, Шарый П.А. О корреляции между почвенной влажностью и некоторыми топографическими величинами // Современные проблемы географии и картографии почв. Мат. Всес. конф., 24-26 сент. 1991 г. – М.: Почвенный ин-т им. Докучаева, 1992. – С. 70-71.