

УДК 528.91

На правах рукописи

Кравченко Юрий Афанасьевич

ИНФОРМАЦИОННОЕ ГЕОМОДЕЛИРОВАНИЕ:
ПРОБЛЕМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ И ЗНАНИЙ

25.00.35 - “Геоинформатика”

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2013

Работа выполнена в Сибирской государственной геодезической академии (СГГА).

Научный консультант – Пяткин Валерий Павлович, доктор технических наук, профессор, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, заведующий лабораторией обработки изображений.

Официальные оппоненты:

- Журкин Игорь Георгиевич, доктор технических наук, профессор, Московский государственный университет геодезии и картографии, заведующий кафедрой вычислительной техники и автоматизированной обработки информации, профессор;

- Скворцов Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор, Томский государственный университет, профессор;

- Флегонтов Александр Валентинович, доктор технических наук, профессор, ООО “Телепроводник”, директор по научной работе.

Ведущая организация – Институт географии РАН, г. Москва.

Защита состоится “26” декабря 2013 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)” в зале заседаний Ученого совета по адресу: 105064, г. Москва, Гороховский пер., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Автореферат разослан “___” _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д. т. н., доцент

О. В. Вшивкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Геопространственные данные (ГД) будут важным компонентом национальных информационных ресурсов, создание которых определено Концепцией создания и развития инфраструктуры пространственных данных (ИПД) в РФ, Федеральной целевой программой “Глобальная навигационная система”, Стратегией развития информационного общества в РФ. Создание ИПД, полномасштабное развертывание отечественной спутниковой системы определения координат ГЛОНАСС и снятие ограничений на распространение ГД позволяют прогнозировать экспоненциальный рост числа их потребителей в ближайшие годы, сравнимый с развитием средств мобильной связи. Экспансия ГИС в различные сферы ведет к росту многообразия требований пользователей и обостряет традиционную проблему отечественной геоинформатики - отсутствие стандартизации представления:

- 1) *координатного пространства*, что осложняет интеграцию геоинформационных моделей, созданных в разных системах координат;
- 2) *топографических поверхностей*;
- 3) *дискретных объектов геопространства*, что влечет крайнюю неэффективность межсистемного обмена геопространственными данными;
- 4) *картографических изображений*, следствием чего является неудовлетворительное качество систем картографического отображения.

Перечисленные проблемы в совокупности образуют *комплексную проблему представления геопространственных данных и знаний*. Ее решение в принципе невозможно без радикальных изменений *методологии* геоинформационного моделирования. Стратегическим направлением в развитии ГИС представляется их интеллектуализация, разработка как систем, основанных на обработке знаний. Сущность такого подхода была определена А. А. Стогнием как *интеграция через концептуализацию* – реализацию в ЭВМ представлений проблемной области на более высоком уровне абстракции.

Расширение функциональных возможностей ГИС на основе обработки знаний означает переход от ГИС к пост-ГИС - Системам Информационного ГеоМоделирования (СИГМа) и создание предпосылок для качественных изменений в геоинформационном обеспечении.

Степень разработанности проблемы. Информационное гео моделирование представляет собой интенсивно развивающееся направление. В топографо-геодезическом и картографическом производстве для создания цифровых топографических карт (ЦТК) используются программные комплексы, в совокупности обеспечивающие автоматизацию *всех* процессов от получения и первичной обработки данных до подготовки карт к изданию.

Значительный вклад в становление и развитие геоинформатики и автоматизированного картографирования в РФ внесли Антипов И.Т., Асланикашвили А.Ф., Берлянт А.М., Бойко А.В., Васмут А.С., Горбачев В.Г., Гук А.П., Жалковский Е.А., Журкин И.Г., Зотов Г.А., Карпик А. П., Киенко Ю.П., Казанцев Н. Н., Комосов Ю.А., Костюк Ю.Л., Кошкарёв А.В., Лисицкий Д.В., Лютый

А.А., Макаренко Н.Л., Мартыненко А.И., Неумывакин Ю.К., Нехин С. С., Новаковский Б.А., Пяткин В. В., Рогачев А.В., Рюмкин А. И., Савиных В.П., Сербенюк С.Н., Скворцов А. В., Тикунов В.С., Тюфлин Ю.С., Флегонтов А. В., Халугин Е.И., Цветков В.Я., Шайтура С. В., Ширяев Е.Е. и другие исследователи.

Хотя цифровое картографирование имеет 25-летнюю историю, как конечная продукция топографо-геодезического производства ЦТК вызывают множество претензий со стороны потребителей и имеют обращение преимущественно *внутри* топографо-геодезического производства. Причина такого состояния дел заключается в несоответствии содержания и формы представления геоинформации в виде ЦТК требованиям пользователей.

Многообразие ГИС при отсутствии удовлетворительных решений по представлению ГД ставит под вопрос возможность и целесообразность распространения геоинформации, в связи с чем возникает проблема унификации и стандартизации представления геопространственных данных и знаний, известная также под названиями “проблема конвертирования”, “проблема единого формата”, “проблема единого геоинформационного пространства”. Для обеспечения межсистемного обмена геопространственными данными и их распространения в середине 1980-х гг. была разработана Единая система классификации и кодирования картографической информации (ЕСКККИ), но она отвергается практически всем геоинформационным сообществом. Таким образом, важная для всех потребителей геоинформации проблема унификации и стандартизации представления геопространственных данных и знаний до сих пор не получила удовлетворительного решения. Актуальность названной проблемы является предметом как спорадических публикаций в научных журналах, так и систематических обсуждений на конференциях по геоинформатике.

Цель и задачи исследования. Цель работы заключается в повышении эффективности ГИС на основе развития функциональных возможностей и унификации представления геопространственных данных и знаний.

Для достижения указанной цели исследований множество задач, решаемых ГИС, разбито на пять наиболее крупных классов (рис. 1):

- геометрические задачи, что требует представления координатного пространства (модели “пустого” геопространства);
- моделирование непрерывных объектов (топографических поверхностей и геофизических полей);
- моделирование дискретных объектов геопространства и геосистем;
- программное построение картографических изображений;
- прикладные задачи, определяемые назначением систем.

Последний класс задач в силу их специфики и многообразия не является предметом исследования в настоящей работе; ее содержание составляют первые четыре класса задач. На рис. 1 поставленные задачи и полученные результаты исследований выделены двойной рамкой.

Объект и предмет исследований. Объектом исследований являются процессы конструирования систем информационного геомоделирования. Предметом исследований служат методы представления данных и знаний в СИГМа.

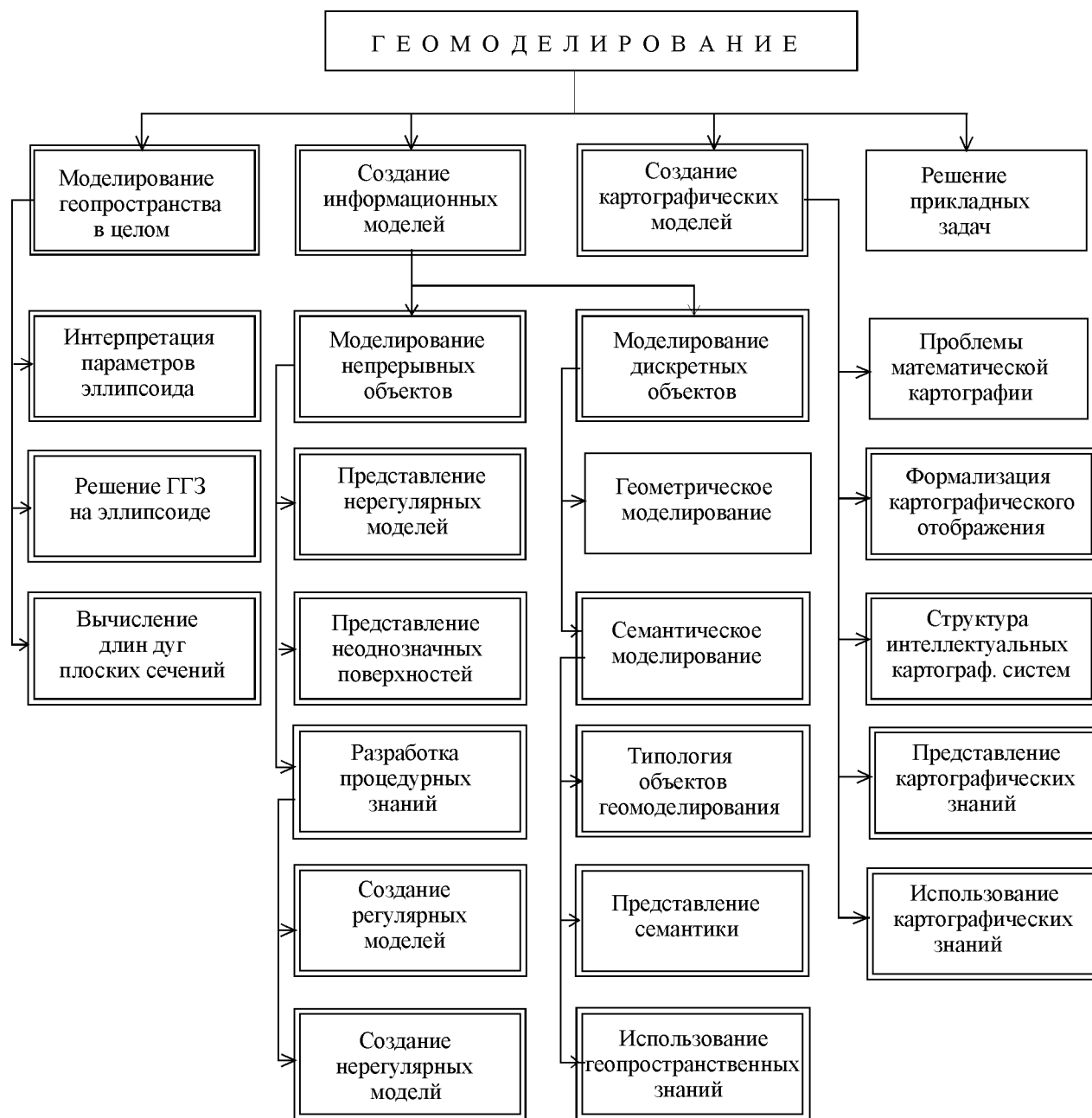


Рис. 1. Проблемная область и основные результаты исследований

Методологическая, теоретическая и экспериментальная база исследования. В процессе исследований были использованы методы теории множеств, математической логики, логической семантики, теории графов, теории реляционных баз данных, искусственного интеллекта, линейной алгебры, дифференциального и интегрального исчисления, сфероидической геодезии, картографии.

Основные научные положения диссертации, выносимые на защиту:

- в области *представления координатного пространства*: система критериев для оценки координатного пространства; предложение по использованию в СИГМа эллипсоида вращения в качестве модели геопространства; интерпретация величин сфероидической геодезии с позиций линейной алгебры; замкнутая система точных формул для решения главных геодезических задач на эллипсоиде; формулы для вычисления длин дуг плоских сечений эллипсоида и геодезических линий;
- в области *моделирования топографических поверхностей*: меры сложности кривых и топографических поверхностей; структура плоской и пространственной триангуляции для представления нерегулярных кусочно-непрерывных моделей топографических поверхностей; алгоритмы создания регулярных и нерегулярных кусочно-непрерывных моделей однозначных и неоднозначных топографических поверхностей;
- в области *моделирования дискретных объектов*: структура систем информационного гео моделирования, основанных на знаниях; содержание, структура и общая организация геопространственных знаний в виде семантической сети; метод представления семантической информации; методы использования геопространственных знаний;
- в области *представления картографических изображений*: структура систем картографического отображения, основанных на знаниях; основы формальной картографии в виде алгебры картографических изображений; предложение по языку картографических изображений; информационные темплеты дискретных объектов; общая организация картографических знаний в виде продукционной системы; методы использования картографических знаний.

Достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается:

- использованием строгих математических и логических методов;
- проведением вычислительных экспериментов;
- публикацией в научных сборниках и журналах (по теме диссертации опубликовано 30 статей, из них 16 – в рейтинговых журналах);
- докладами и обсуждением на 12 научных и научно-технических конференциях, в том числе международных;
- практическим применением в шести производственных организациях.

Новизна научных результатов исследования заключается:

- в области *представления координатного пространства* – впервые выполнено рассмотрение вопросов сфероидической геодезии с позиций линейной алгебры, что позволило установить в ней новые связи и получить новые и более эффективные решения некоторых задач, в том числе главных геодезических задач на эллипсоиде вращения;
- в области *моделирования топографических поверхностей* – разработаны новые методы представления и построения регулярных и нерегулярных кусочно-

непрерывных моделей однозначных и (впервые) неоднозначных топографических поверхностей;

- в области моделирования дискретных объектов – впервые разработаны структура систем информационного гео моделирования, основанных на знаниях, структура и методы использования геопространственных знаний, новый способ представления семантической информации;

- в области представления картографических изображений – на основе методов дедуктивной формализации содержательных теорий впервые разработаны основные положения формальной картографии в виде алгебры картографических изображений, представление картографических знаний в виде продукционной системы и методы их использования.

Научная значимость работы:

- в области представления координатного пространства: применение линейной алгебры в сфероидической геодезии характеризуется продуктивностью и делает ее теорию более логичной и последовательной, что имеет методологическое значение и заслуживает отображения в учебной литературе;

- в области моделирования топографических поверхностей: разработанные структуры данных и алгоритмы создают теоретическую основу для применения ЭВМ с параллельной обработкой данных;

- в области моделирования дискретных объектов: разработанные принципы организации и использования геопространственных данных и знаний образуют методологический базис современной теории информационного моделирования дискретных объектов геопространства;

- в области представления картографических изображений: полученные результаты содержат основные принципы создания и функционирования систем картографического отображения, основанных на знаниях, в виде последовательной теоретической системы, которая может быть использована при разработке учебника по формальной картографии.

Практическая значимость работы:

- в области представления координатного пространства - выбор эллипсоида вращения в качестве модели геопространства в целом является эффективным решением проблемы интеграции геопространственных данных для сколь угодно больших территорий и позволяет снять проблему искажений картографических проекций, повысить точность решения геометрических задач и уровень унификации программных средств; решение главных геодезических задач на эллипсоиде вращения обеспечивает повышение быстродействия алгоритмов и получение любой необходимой точности и дает возможность применения методов концептуального программирования при разработке программного обеспечения; формулы для вычисления длин дуг плоских сечений эллипсоида и геодезических линий на любое расстояние обеспечивают получение результатов с топографической точностью (абсолютная погрешность не более 5.9 мм, относительная погрешность менее 7×10^{-10}) и геодезической (абсолютная и от-

носительная погрешности соответственно 0.1 мм и 1×10^{-11}); выбор эллипсоида вращения, в качестве модели геопространства в целом, может быть использован при разработке стандартов представления ГД;

- в области моделирования топографических поверхностей: меры сложности кривых и топографических поверхностей позволяют дать объективную оценку их сложности, что имеет важное производственное значение; предложенное компактное представление триангуляции позволяет снизить потребность в оперативной памяти в два раза по сравнению с существующими методами; методы создания регулярных и нерегулярных кусочно-непрерывных моделей топографических поверхностей отличаются высокой точностью и всегда характеризуются вычислительной сложностью $O(n)$, что другими методами достигается только в лучшем случае; особо ценным качеством разработанных алгоритмов создания регулярных и нерегулярных моделей является возможность очень высокого распараллеливания, что позволяет считать их алгоритмами будущего; разработанные структура моделей неоднозначных топографических поверхностей и метод их создания обеспечивают моделирование топографических поверхностей любой сложности; разработанная структура плоской и пространственной триангуляции заслуживает использования при разработке стандартов представления топографических поверхностей;

- в области моделирования дискретных объектов: разработанные структура геопространственных знаний и метод кодирования семантической информации позволяют избавиться от контекстной зависимости, достичь однозначной интерпретации данных принимающими системами, отказаться от необходимости указания для каждого объекта в базе данных его места в системе классификации и, как следствие, сократить объем геопространственных данных, получать знания, представленные имплицитно, с помощью логического вывода, избавить принимающую систему от необходимости знания классификации в передающей системе геомоделирования, что решает проблему межсистемного интерфейса, удовлетворительное решение которой до сих пор не было найдено; создают необходимые и достаточные условия для образования единого семантического пространства в геоинформатике и интеграции геоинформационных систем различной тематической направленности; полученные результаты могут служить базой при унификации и стандартизации представления ГД;

- в области представления картографических изображений: разработанные структуры систем картографического отображения и картографических знаний позволяют моделировать мышление картографа при создании картографических произведений, вследствие чего повышаются коэффициент автоматизации и коэффициент готовности таких систем, что имеет важное значение при геоинформационном картографировании; алгебра картографических изображений представляет собой удобный инструмент для описания и манипулирования картографическими изображениями; информационные темплеты служат реальной альтернативой правилам цифрового описания объектов; язык картографических изображений может использоваться как язык публикаций (при описании систем картографических условных знаков), как средство коммуникации между картографом и компьютером и как язык представления картографических произве-

дений при межсистемном обмене; алгебра картографических изображений может использоваться при унификации и стандартизации представления картографических изображений.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика диссертации наиболее полно соответствует позициям: 1 – “Теоретические и экспериментальные исследования в области развития научных и методических основ геоинформатики”; 3 – “Геоинформационные системы (ГИС) разного назначения, типа (справочные, аналитические, экспертные и др.), пространственного охвата и тематического содержания”; 5 – “Базы знаний по разным предметным областям”; 6 – “Математические методы, математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение для ГИС” Паспорта научных специальностей, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ по естественным наукам.

Апробация результатов исследований. Основные результаты исследований докладывались на 12 научно-технических конференциях: Всесоюзная научно-техническая конференция “Проблемы автоматизации топографо-геодезических и картографических работ” (Новосибирск, 1981 г.); XVII конгресс Международного геодезического союза (Болгария, София, 1983 г.); Международная конференция ИНТЕРКАРТО 3 “ГИС для устойчивого развития территорий” (Новосибирск, 1997 г.); Третья учебно-практическая конференция “Проблемы ввода и обновления пространственной информации” (Москва, 1998 г.); Международная конференция ИНТЕРКАРТО 4 “ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий” (Барнаул, 1998 г.); Международная научно-техническая конференция, посвященная 65-летию СГГА – НИИГАиК “Современные проблемы геодезии и оптики” (Новосибирск, 1998 г.); Научно-техническая конференция, посвященная 90-летию К.Л. Проворова, заслуженного работника геодезии и картографии “Геомониторинг на основе современных технологий сбора и обработки информации” (Новосибирск, 1999 г.); V научно-техническая конференция преподавателей СГГА “Современные проблемы геодезии и оптики” (Новосибирск, 2000 г.); Международная научно-практическая конференция (Томск, 2000); VI научно-техническая конференция преподавателей СГГА “Современные проблемы геодезии и оптики” (Новосибирск, 2001 г.); VIII международная научно-техническая конференция, посвященная 70-летию СГГА “Современные проблемы геодезии и оптики” (Новосибирск, 2003 г.); 63-я научно-техническая конференция Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) (Новосибирск, 2006 г.).

Реализация результатов исследований. Основные результаты исследований были реализованы в автоматизированной системе картографирования (АСК-1), переданы в ФГУП Государственный научно-внедренческий центр геоинформационных систем и технологий (ГосГИСцентр) г. Москва, внедрены в ООО “ГЕОКАД плюс” г. Новосибирск, ЗАО Центр системных исследований

“Интегро” г. Уфа, ООО НПО “Сибгеоинформатика” г. Томск, ООО “Индорсофт” г. Томск, ООО “ЛТЦ Аэросоюз” г. Новосибирск. Кроме того, основные результаты диссертации используются при преподавании в Томском государственном университете и Полоцком государственном университете (Беларусь). Монография “Основы конструирования систем гео моделирования”, содержащая основные результаты исследований, в 2009 г. награждена ГИС-Ассоциацией дипломом в номинации “Лучшее издание”. Копии актов о внедрении и использовании результатов исследований даны в Приложениях А - К к диссертации.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации издана монография “Основы конструирования систем гео моделирования”, опубликованы 30 научных работ (все – без соавторов); в том числе 16 работ - в центральных изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ (журнал «Геодезия и картография»). Список работ приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников. Общий объем работы составляет 243 страницы (без приложений), из них список литературы – 12 страниц (219 наименований). Работа содержит 31 таблицу, 79 рисунков и 9 приложений.

Разделы диссертации:

- 1 Представление геопространства в целом
- 2 Представление топографических поверхностей
- 3 Представление дискретных объектов
- 4 Представление картографических изображений геопространства

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дается общая характеристика работы; приводится обоснование актуальности исследований и степень разработанности проблемы; установлены цель исследований и вытекающие из нее задачи, объект и предмет исследований; сформулированы научные положения, выносимые на защиту; показаны научная новизна, научная и практическая значимость работы, даны сведения об апробации работы и внедрении результатов, описывается структура диссертации.

В разделе 1 необходимость представления положения объектов геопространства отмечена как отличительная особенность ГИС, выделяющая их в отдельный класс из всего множества информационных систем. Таким образом, первой проблемой при гео моделировании является выбор “координатного пространства”, оказывающий доминирующее влияние на точность и сложность

решения геометрических задач. Выбор координатного пространства может быть разделен на две подзадачи: выбор модели геопространства в целом и определение системы координат на такой модели, что не столь принципиально как решение первой подзадачи.

Главными критериями при выборе модели геопространства являются три: модель должна быть *единой*; обеспечивать необходимую *точность* решения задач в пределах моделируемого геопространства; быть *эффективной*.

Из теоретически возможных вариантов модели геопространства наиболее адекватной сформулированной системе критериев моделью является эллипсоид вращения. Для систем геомоделирования наиболее естественным координатным пространством представляется система координат на земной поверхности. Что позволяет легко интегрировать данные об объектах, расположенных на сколь угодно большом удалении, и не возникает проблема интеграции данных, представленных в разных картографических проекциях. Но решение задач на эллипсоиде характеризуется известной сложностью, поэтому его использование в качестве модели геопространства требует дальнейших исследований с целью оптимизации вычислений и рационализации теории сфероидической геодезии.

С указанной целью в работе использована известная возможность получения эллипса сечением прямого кругового цилиндра плоскостью. При этом первый эксцентриситет e интерпретируется как $e = \sin \varepsilon$, где ε - угол между плоскостью эллипса и плоскостью окружности. Отсюда легко получить выражения для второго эксцентриситета, отношения полуосей, сжатия эллипсоида, полярного радиуса. Естественным образом возникает понятие приведенной широты как *прообраза геоцентрической широты* точки на эллипсоиде вращения. Кроме того, на исходной плоскости можно определить два характерных направления: по радиус-вектору точки на окружности и перпендикулярного к нему направления. На эллипсе им соответствуют направления по радиус-вектору точки и по касательной к эллипсу. Значения *радиального масштаба* μ по направлению радиус-вектора точки на эллипсе и *тангенциального масштаба* η по касательной к эллипсу определяются выражениями

$$\mu = \sqrt{k^2 \cos^2 u + \sin^2 u},$$

$$\eta = \sqrt{k^2 \sin^2 u + \cos^2 u},$$

где $k = 1 / \cos \varepsilon$. Получены формулы, выражающие значения радиального и тангенциального масштабов в виде функций геоцентрической и геодезической широты. Формула для тангенциального масштаба η имеет вид:

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}},$$

где выражение в знаменателе - традиционное обозначение первой геодезической величины W . Последнее соотношение устанавливает геометрический смысл *первой геодезической величины* как величины, обратной масштабу η .

Результаты, приведенные выше, явились основанием для использования в сфероидической геодезии методов более общей теории – линейной алгебры.

Поэтому далее рассмотрено линейное отображение трехмерного евклидова пространства E (прообраза) на другое такое же пространство F - образ пространства E :

$$\vec{R} = T \cdot \vec{r},$$

где \vec{r} – радиус-вектор произвольной точки в пространстве E :

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix},$$

\vec{R} – образ радиус-вектора \vec{r} в пространстве F :

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix},$$

T – оператор отображения пространства E на пространство F

$$T = \begin{pmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Масштаб μ отображения произвольного вектора \vec{v} равен

$$\mu = \frac{V}{v} = \sqrt{k^2 \cos^2 u + \sin^2 u}. \quad (1)$$

Получены формулы, характеризующие отображение длин и направлений на произвольной плоскости. Масштаб по направлению A на плоскости выражается формулой

$$m = \frac{V}{v} = \sqrt{\mu^2 \cos^2 A + k^2 \sin^2 A},$$

где масштаб μ по направлению градиента \vec{G} плоскости может быть определен по формуле (1); k - масштаб вдоль вектора \vec{H} , лежащего в плоскости и ортогонального вектору градиента.

Сфере S в пространстве E с центром в начале координат и радиусом r

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2,$$

в пространстве F соответствует эллипсоид вращения

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1,$$

с малой полуосью $b = r$, большой полуосью $a = kr$, а значения эксцентриситетов и константа k связаны соотношениями

$$e^2 = \frac{k^2 - 1}{k^2}, \quad e'^2 = k^2 - 1, \quad k^2 = \frac{1}{1 - e^2}.$$

Получены соотношения между элементами дуги большого круга на сфере и соответствующими элементами плоского центрального сечения эллипсоида: между *долготой* L точки на сфере и *долготой* Λ точки на эллипсоиде

$$\Lambda = L;$$

между *начальным азимутом* A_0 дуги большого круга на сфере и *начальным азимутом* α_0 плоского центрального сечения эллипсоида

$$tg \alpha_0 = k tg A_0,$$

между *приведенной широтой* u на сфере и *широтой* φ на эллипсоиде

$$tg \varphi = \frac{1}{k} tgu,$$

между *центральный углом* s , стягивающим дугу большого круга на сфере, и *центральный углом* σ , стягивающим дугу плоской кривой на эллипсоиде

$$tg \sigma = \frac{m_0}{k} tgs,$$

где m_0 - масштаб на экваторе эллипсоида по азимуту α_0

$$m_0 = \sqrt{k^2 \sin^2 A_0 + \cos^2 A_0},$$

между *азимутом плоской кривой на эллипсоиде* и *азимутом дуги большого круга на сфере*

$$tg \alpha = \frac{k}{\eta} tg A,$$

где η - масштаб в точке с широтой u по направлению меридиана

$$\eta = \sqrt{k^2 \sin^2 u + \cos^2 u}.$$

Получены соотношения между элементами треугольников на сфере и эллипсоиде вращения:

Элементы на сфере	Элементы на эллипсоиде
$\sin A_0 = \cos u \sin A$	$\sin \alpha_0 = \cos \varphi \sin A'$
$tg A_0 = tg A \cos s$	$tg \alpha_0 = tg \alpha \cos \sigma$
$\cos A = \cos A_0 \cos l$	$\cos A' = \cos \alpha_0 \cos \lambda$
$tgl = tgs \sin A_0$	$tg \lambda = tg \sigma \sin \alpha_0$
$tgl = tg A \sin u$	$tg \lambda = tg A' \sin \varphi$
$\sin l = \sin s \sin A$	$\sin \lambda = \sin \sigma \sin A'$
$\cos s = \cos l \cos u$	$\cos \sigma = \cos \lambda \cos \varphi$
$\sin u = \cos A_0 \sin s$	$\sin \varphi = \cos \alpha_0 \sin \sigma$
$tgu = ctg A_0 \sin l$	$tg \varphi = ctg \alpha_0 \sin \lambda$
$tgu = tgs \cos A$	$tg \varphi = tg \sigma \cos A'$

где A' - значение *приведенного* азимута, может быть вычислено по формуле

$$\sin A' = \frac{\mu}{m_0} \sin A.$$

Использование аппарата линейной алгебры в сфероидической геодезии имеет методологическое значение, делает вывод многих ее формул более простым и логичным. На основе указанного подхода получены решения главных

геодезических задач на эллипсоиде вращения с применением плоских центральных сечений в виде замкнутой системы точных формул.

Прямая геодезическая задача на эллипсоиде: по заданным значениям широты φ_1 и долготы Λ_1 исходной точки 1, азимута α_{12} дуги центрального сечения 1-2 в точке 1 и угла σ , стягивающего дугу плоской кривой, вычислить геоцентрические координаты φ_2 и Λ_2 точки 2 и обратный азимут α_{21} . Решение состоит в следующем.

1) Переход от азимута α на эллипсоиде приведенному азимуту A' по формуле

$$\operatorname{tg} A'_{12} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_{12}}{\cos(B_1 - \varphi_1)}.$$

2) Нахождение геоцентрической широты по формуле косинуса стороны

$$\sin \varphi_2 = \sin \varphi_1 \cos \sigma + \cos \varphi_1 \sin \sigma \cos A'_{12}.$$

3) Определение разности долгот по формуле синусов

$$\sin \lambda = \frac{\sin \sigma}{\cos \varphi_2} \sin A'_{12}.$$

4) Вычисление долготы определяемой точки

$$\Lambda_2 = \Lambda_1 + \lambda.$$

5) Определение обратного приведенного азимута по формуле синусов

$$\sin A'_{21} = \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \sin A'_{12}.$$

6) Переход от обратного приведенного азимута к обратному азимуту на эллипсоиде по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_{21} = \cos(B_2 - \varphi_2) \operatorname{tg} A'_{21}$$

или

$$\operatorname{tg} \alpha_{21} = \operatorname{tg} A'_{21} \frac{1 + (k^2 - 1) \sin^2 \varphi_2}{\sqrt{1 + (k^4 - 1) \sin^2 \varphi_2}}.$$

Обратная геодезическая задача на эллипсоиде: по координатам φ_1 , Λ_1 и φ_2 , Λ_2 двух точек найти прямой α_{12} и обратный α_{21} азимуты дуги центрального сечения эллипсоида и ограничивающий ее центральный угол σ . Решение состоит в следующем.

1) Определение угла σ по формуле косинуса стороны

$$\cos \sigma = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(\Lambda_2 - \Lambda_1).$$

2) Вычисление прямого и обратного приведенных азимутов

$$\left. \begin{aligned} \sin A'_{12} &= \frac{\sin(\Lambda_2 - \Lambda_1)}{\sin \sigma} \cos \varphi_2 \\ \sin A'_{21} &= \frac{\sin(\Lambda_2 - \Lambda_1)}{\sin \sigma} \cos \varphi_1 \end{aligned} \right\}.$$

3) Переход от приведенных азимутов к азимутам плоской кривой на эллипсоиде по формулам

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_{12} &= \cos(B_1 - \varphi_1) \operatorname{tg} A'_{12} \\ \operatorname{tg} \alpha_{21} &= \cos(B_2 - \varphi_2) \operatorname{tg} A'_{21} \end{aligned} \right\}$$

или

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_{12} &= \operatorname{tg} A'_{12} \frac{1 + (k^2 - 1) \sin^2 \varphi_1}{\sqrt{1 + (k^4 - 1) \sin^2 \varphi_1}} \\ \operatorname{tg} \alpha_{21} &= \operatorname{tg} A'_{21} \frac{1 + (k^2 - 1) \sin^2 \varphi_2}{\sqrt{1 + (k^4 - 1) \sin^2 \varphi_2}} \end{aligned} \right\}.$$

Получены эффективные формулы для вычисления длин дуг плоских центральных сечений эллипсоида от экватора до точки с широтой u с *топографической* и *геодезической* точностью соответственно

$$S = p_1 u - p_2 \operatorname{arctg}(p \operatorname{tgu}).$$

$$S = \frac{b}{8} \left[(12 + t^2) \operatorname{arctg} q - \frac{t^2 q}{1 + q^2} - \frac{4}{p} \operatorname{arctg}(p q) \right].$$

где коэффициенты p , p_1 и p_2 - константные выражения, зависящие от параметров эллипсоида, а $q = \operatorname{tgu} = (1/k) \operatorname{tg} B = k \operatorname{tg} \varphi$.

Из сравнения дифференциальных уравнений для длины плоского центрального сечения и геодезической линии следует возможность использования полученных формул для вычисления длин геодезических линий.

Для эллипсоида Красовского последние формулы характеризуются соответственно максимальными абсолютными ошибками 5.9 и 0.1 мм и относительными ошибками менее 7×10^{-10} и 1×10^{-11} . С уменьшением расстояний и эксцентриситета ошибки вычисления длин убывают; для окружности полученные формулы превращаются в точные. Данные формулы отличаются от известных формул своей *универсальностью*, позволяет вычислять длины дуг плоских сечений эллипсоида и геодезических линий как функций приведенной, геодезической и геоцентрической широты. Основная цель получения указанных формул - решение задач в среде СИГМа, приведенные погрешности формул дают основания считать их применимыми при решении геодезических задач.

В разделе 2 содержатся результаты исследований проблемы моделирования *топографических поверхностей* (ТП). Сложность моделирования ТП обусловлена их плохими дифференциальными свойствами. Индивидуальный облик ТП, ее сложность определяются структурными линиями. В работе дано *строгое определение структурных линий* на основе понятий дифференциальной геометрии. На основе аксиоматического подхода установлены меры сложности кривых и ТП

$$C_k = L/l,$$

$$C_s = \frac{1}{S_0} \sum_{i=1}^n S_i,$$

где L - длина кривой, l – длина ее замыкающей; S_0 и S_i - соответственно площадь проекции оцениваемой поверхности на поверхность относимости и площадь i -го треугольного элемента поверхности.

Развитие моделирования ТП в настоящее время происходит по линии создания регулярных и нерегулярных кусочно-непрерывных моделей. При этом задача моделирования разделяется на две подзадачи: разработку структуры модели и разработку способа ее построения.

Разработка структуры регулярных моделей не является вопросом, заслуживающим внимания. При создании регулярных моделей сложность связана с вычислением значений высот в узлах регулярной сетки по системе произвольно расположенных исходных точек и с дальнейшим получением более плотных регулярных моделей различной гладкости.

В работе получены необходимые условия гладкости кусочно-непрерывных функций одной переменной в виде суммы произведений локальных $f_i(x)$ и весовых $p_i(x)$ функций вида

$$F = \sum_{i=1}^n F_i(x),$$

где

$$F_i(x) = f_{i-1}(x)p_{i-1}(x) + f_i(x)p_i(x).$$

Регулярная модель поверхности может оказаться не слишком гладкой и для разных приложений может требоваться построение более плотных моделей различной гладкости. В работе получены аналогичные условия непрерывности для кусочно-непрерывных функций двух переменных, заданных значениями на регулярной сетке, и их производных и решение задачи получения более плотных регулярных кусочно-непрерывных моделей различной гладкости с помощью метода, представляющего собой обобщение изложенного выше способа на случай функций двух переменных.

Для построения регулярных моделей ТП разработан метод с применением сплайнов на подпространстве. Сущность метода заключается в решении задачи интерполяции с минимизацией функционала

$$\Phi(H) = \iint_{\Omega} \left(\left(\frac{dH}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dH}{dy} \right)^2 \right) d\Omega = \min. \quad (2)$$

Построение интерполяционного сплайна на подпространстве означает прохождение получаемой поверхности H через заданные точки

$$H(P_i) = z_i \quad (i = 1, \dots, n), \quad (3)$$

и минимум функционала (2). Из (2) и (3) следуют две системы уравнений:

$$h_{kl} - \frac{1}{9} \sum_{j=l-1}^{l+1} \sum_{i=k-1}^{k+1} h_{ij} = 0. \quad (4)$$

$$h_{ij}(i+1-x)(j+1-y) + h_{ij+1}(i+1-x)(y-j) + \\ + h_{i+1j}(x-i)(j+1-y) + h_{i+1j+1}(x-i)(y-j) = z(x, y), \quad (5)$$

где h – значения высот в узлах квадратной сетки, покрывающей область Ω ; $z(x, y)$ – значения высот исходных точек с координатами (x, y) .

При разработке алгоритма область моделирования Ω ограничена прямыми $x=1$, $x=m$, $y=1$ и $y=n$, покрыта сеткой квадратов со стороной 1 и содержит исходные точки $\{x_i, y_i, z_i\}$, произвольно расположенные по отношению к модельной сетке. Построение интерполяционного сплайна на подпространстве осуществляется следующим образом:

- 1) координаты исходных точек преобразуются так, чтобы они попали внутрь сетки квадратов;
- 2) определяются начальные значения высот в узлах квадратной сетки;
- 3) устанавливается начальное значение параметра α ;
- 4) с помощью итераций уточняются значения высот в узлах сетки квадратов;
- 5) координаты сетки преобразуются в исходную систему координат.

В результате решения системы уравнений отыскиваются значения сплайна на подпространстве – значения высот в узлах сетки. Если в процессе итеративного решения системы уравнений (4) при β -ой итерации значения в узлах регулярной сетки вычислять по формуле

$$h_{kl}^{(\beta)} = h_{kl}^{(\beta-1)} + \alpha^{(\beta)} \left[\frac{1}{9} \sum_{j=l-1}^{l+1} \sum_{i=k-1}^{k+1} h_{ij}^{(\beta-1)} - h_{kl}^{(\beta-1)} \right],$$

где $1 = \alpha^{(1)} > \alpha^{(2)} > \dots > \alpha^{(\gamma)} = 0$, то после окончания γ итераций полученный сплайн будет отвечать условиям (2) при ограничениях (3).

Каждая итерация состоит из процедур сглаживания и интерполяции. Описанная схема вычислений инвариантна по отношению к конкретным реализациям метода. Модификации алгоритма могут отличаться способом определения начальных значений в узлах сетки, способом сглаживания поверхности, способом вычисления поправок за отклонение полученной поверхности от исходных точек, начальным значением, законом и скоростью изменения параметра α , критерием окончания итераций.

Данный метод моделирования обладает такими свойствами как простота, модифицируемость; линейная вычислительная сложность; устойчивость к ошибкам в исходных данных; отсутствие потребности в оперативной памяти для хранения коэффициентов систем линейных уравнений. Кроме того, он обладает возможностью: применения для сглаживания и интерполяции; высокого распараллеливания операций; реализации на целочисленной арифметике и рядом других.

Представление нерегулярных моделей ТП в виде триангуляции требует особого рассмотрения в силу их универсальности. В триангуляции имеются два

вида отношений: смежности и инцидентности. При выборе структур данных для триангуляции требуется включать *все* отношения, позволяющие без многочисленных переборов переходить от вершин к ребрам и треугольникам и от ребер к треугольникам, а также в обратном направлении.

Кроме памяти, необходимой для хранения отношений, требуется пропорциональное $3n$ пространство для хранения значений координат и высот исходных точек. Таким образом, представление всех данных о триангуляции требует значительных объемов оперативной памяти (почти 100 байт на каждую вершину). Поэтому задача структурирования триангуляции остается актуальной.

Разработан способ представления нерегулярной плоской триангуляции, основанный на постановке в соответствие каждой точке не более двух инцидентных ей треугольников и не более трех инцидентных ребер. Номера ребер и треугольников не хранятся, а вычисляются как функции от номера вершины. Номера левого и правого треугольников при этом определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} t_L(i) &= 2i - 1 \\ t_R(i) &= 2i \end{aligned} \right\}.$$

Аналогично устанавливается нумерация ребер:

$$\left. \begin{aligned} e_L(i) &= 3i - 1 \\ e_F(i) &= 3i \\ e_R(i) &= 3i + 1 \end{aligned} \right\}.$$

Разработана структура P триангуляции, названная *компактным представлением триангуляции* (КПТ) и имеющая вид $P = \{(C_i, S_i, B_i, L_i, R_i, F_i)\}$, где C – номер текущей вершины, S – ее синоним, B – задняя, L – левая, R – правая и F – передняя вершины. Данная структура позволяет хранить не более $5n$ элементов. Избыточными в ней являются указатели на заднюю вершину, их число минимально и равно числу точек n . При использовании КПТ требуемый объем памяти уменьшается в два раза по сравнению с другими структурами данных.

Известные алгоритмы *построения плоской триангуляции* в лучших случаях характеризуются вычислительной сложностью $O(n \ln n)$. Разработаны два метода построения плоской триангуляции - *прямой* и *обратный волновые алгоритмы*. Их преимущества и недостатки заключаются в следующем.

- 1) Волновые алгоритмы обладают алгоритмической простотой и линейной вычислительной сложностью.
- 2) Алгоритмы дают возможность построения триангуляции для областей моделирования сложной конфигурации как единого целого.
- 3) Недостаток волновых алгоритмов - потребность в дополнительной памяти для хранения сетки квадратов - устраняется разбиением ее на блоки.
- 4) При попадании нескольких исходных точек в один квадрат сетки квадратов возможны осложнения. Эта проблема решается уменьшением размеров квадрата или последующей модификацией триангуляции.

5) При реализации других алгоритмов создания триангуляции учет структурных линий приводит к возрастанию их логической сложности. Волновые алгоритмы позволяют легко включать структурные линии в обработку.

б) Важное достоинство волновых алгоритмов, которое на машинах с фоннеймановской архитектурой не может быть использовано, - возможность очень высокого распараллеливания вычислений, что станет решающим фактором при массовом распространении ЭВМ с параллельной обработкой.

Разработан *метод представления неоднозначных ТП* на основе одинаковой ориентации всех треугольников на моделируемой поверхности. Если моделируемая ТП является заведомо неоднозначной или такая возможность допускается, то для ориентации всех треугольников достаточно задать явным образом ориентацию *одного* треугольника. Ориентация остальных треугольников осуществляется программно. Проекция треугольников на обратных склонах меняют свою ориентацию и знак площади проекции, что используется для обнаружения треугольников на обратных склонах. Для *построения моделей неоднозначных ТП* получен метод, являющийся развитием плоских волновых алгоритмов на трехмерный случай.

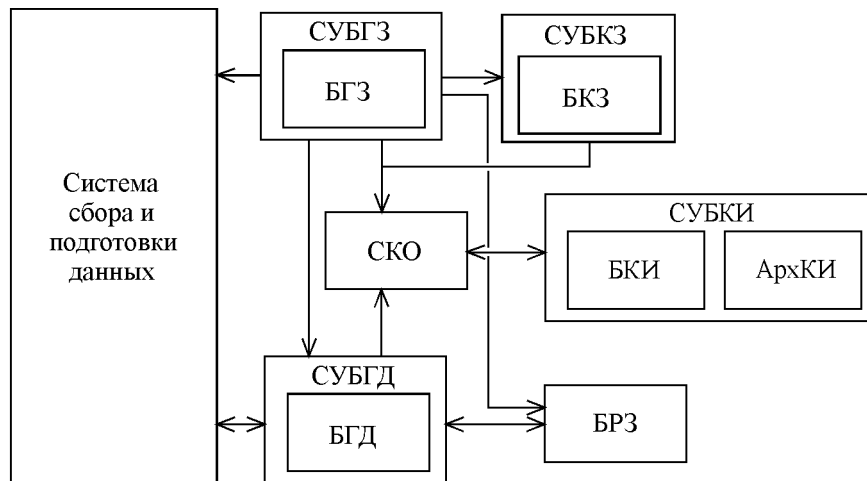
Таким образом, разработанные структуры данных и алгоритмы обеспечивают эффективное представление и создание моделей ТП *любой сложности*.

Раздел 3 содержит результаты исследований в области *моделирования дискретных объектов* геопространства.

Интеграция разнородных данных в системах информационного геодеширования влечет за собой требование их *универсальности* и *адаптируемости*. Постоянную эволюцию СИГМа следует считать их нормальным состоянием. Для поддержания собственной способности эволюционировать системы геодеширования должны иметь соответствующие функции и структуру, которые необходимо предусмотреть уже на стадии разработки основных концепций систем. Методологической основой дальнейшего развития возможностей СИГМа являются методы искусственного интеллекта. Показано, что как проблемная область разработка систем геодеширования отвечает необходимым условиям применения методов искусственного интеллекта. Структура СИГМа, основанной на знаниях, представлена на рис. 2.

Рассмотрены основные категории, используемые при геодешировании: объекты, свойства и отношения. Совокупность геометрических и совокупность семантических свойств трактуются соответственно как *геометрический* и как *семантический объекты*. Свойства разделены на универсальные, имманентные и индивидуальные. Дана *трактовка универсальных свойств* (дискретности / непрерывности, целостности, ограниченности, связности, устойчивости) геометрических и семантических объектов. Приводится *типология геометрических и семантических объектов* по их универсальным свойствам.

В результате анализа классификаторов топографической информации установлен их принципиальный недостаток: неоднозначность (контекстная зависимость) представления данных.



- АрхКИ - архив картографических изображений
- БГД - база геопространственных данных
- БГЗ - база геопространственных знаний
- БКЗ - база картографических знаний
- БКИ - база картографических изображений
- БРЗ - блок решения задач
- СУБКЗ - система управления картографическими знаниями
- СУБКИ - система управления картографическими изображениями
- СУБГД - система управления геопространственными данными
- СУБГЗ - система управления геопространственными знаниями
- СКО - система картографического отображения

Рис. 2. Структура интеллектуальной системы геомоделирования

Для представления семантической информации разработана структура геопространственных знаний в виде тезауруса и множества отношений. *Тезаурус* выполняет функцию универсума и содержит перечень всех терминов, используемых для репрезентации содержания топографических карт и планов всех масштабов. С формальной точки зрения тезаурус представляет собой отношение $T(t, i, k, e)$, где t - термин, i - тип термина, k - код термина, e - экспликация термина. Элементы тезауруса подразделяются на четыре категории: названия сущностей; названия свойств и значений качественных свойств; названия единиц измерения количественных свойств. *Код термина* является уникальным внутрисистемным именем термина. Для кодирования терминов используются короткие целые числа, что позволяет хранить в системе 65535 терминов.

При создании *единого семантического пространства* для различных предметных областей расширение области возможных значений кодов легко достигается использованием длинных целых чисел, что позволит представлять более 4 миллиардов терминов. Тезаурус является *реализацией* такого пространства. Использование единого для всех предметных областей перечня понятий и указанного принципа кодирования понятий решает проблему взаимопонимания между различными автоматизированными системами.

Вследствие транзитивности некоторых отношений системы, основанные на знаниях, приобретают способность к логическому выводу и извлечению знаний, представленных в системе имплицитно, к сокращению объемов данных и знаний. Перечень отношений приводится ниже.

Отношение омонимии. Для представления отношения омонимии неоднозначным терминам присваиваются различные коды, а в экспликации термина даются уточняющие пояснения.

Отношение синонимии - $S(k, s)$, где s – некоторый синоним, k – канонический термин, которым должен кодироваться соответствующий ему денотат.

Отношение агрегации служит для описания структуры составных объектов - $A(a, c, m, n)$, где a – объект верхнего уровня (агрегат), c – его компонент, m и n – минимальное и максимальное число вхождений компонента в агрегат.

Отношение таксономии - $O(r, w, s, v)$, где r – родовой объект, w – его разновидность, s – название свойства, v – значение свойства.

Характер локализации - $L(o, l)$, где o – тип объекта, l – возможный характер локализации.

Характеристики свойств. С даталогической точки зрения свойства являются абстрактными объектами и характеризуются свойствами и отношениями. Характеристиками свойств являются тип значения свойств, диапазон допустимых значений, число возможных значений и тип пространственной локализации.

Тип значения свойства t – одно из возможных значений, перечисляемых в списке типов значений свойств. Список *типов значений свойств* - отношение $J(j, l, m, n)$, где j – тип значения, l – длина значения в байтах, m – наименьшее значение, n – наибольшее значение. *Диапазон значений d* характеризует область допустимых значений свойства (*произвольный, ограниченный и перечислимый*).

Перечень допустимых значений свойств - $D(o, x, z)$, где o – термин, указывающий на объект, x – предсказуемое объекту свойство, z – допустимое значение свойства. Допустимыми значениями качественных свойств являются только элементы тезауруса.

Число возможных значений свойства z характеризует однозначность или многозначность свойства. *Тип пространственной локализации l свойства* характеризует зависимость между значением свойства и областью его распространения. По данному признаку свойства разделены на постоянные и переменные.

Отношение агрегации между свойствами - $C(a, k, n)$, где a – составное свойство, k – его компонент, n – число вхождений компонента в агрегат.

Отношение таксономии между названиями свойств – $G(g, i)$, где g – родовое понятие свойства, а i – его разновидность.

Отношение таксономии между значениями свойств - $V(o, x, r, v)$, где o – объект, x – название свойства объекта o , r – родовое значение свойства, v – разновидность значения свойства.

Отношение порядка $P(o, x, v, i)$ между значениями качественных свойств, где o – объект, x – наименование свойства, v – его значение, i – место значения на шкале порядка (целое число).

Единицы измерения. В принимающих системах возникает задача правильного понимания количественных данных. Для представления соответствия

между количественными свойствами и их *единицами измерения* использовано отношение $E(x, t, k, e)$, где x – термин, указывающий на свойство, t – краткое обозначение единицы измерения, k – коэффициент, равный отношению между данной единицей измерения и канонической единицей измерения.

Перечень значений по умолчанию - $U(o, x, u)$, где o – объект (термин тезауруса), x – свойство (термин тезауруса), u – значение свойства по умолчанию.

Отношение предикации - $X(o, x, t, d, z, n, l)$, где o – термин, указывающий на объект, x – термин, обозначающий свойство, t – тип значения свойства, d – диапазон допустимых значений, z – число возможных значений, n – признак обязательности значения свойства, l – тип его пространственной локализации.

Семантические данные содержат информацию, которая может повысить адекватность моделей топографических поверхностей. *Элементы рельефа* рассматриваются как геометрические объекты и делятся на точки, линии и участки поверхности. *Элементы рельефа* - унарное отношение $R(r)$, где r – тип элемента топографической поверхности.

Отношение “объект ситуации – объект рельефа” - $Z(t, p, r)$, где t – термин, указывающий на объект ситуации, p – признак принадлежности к объектам рельефа (допустимые значения “игнорируемый”, “исключаемый”, “естественный”, “искусственный” и “произвольный”), и r – объект как элемент рельефа.

Лингвистические знания. Предлагаемая совокупность лингвистических знаний содержит список используемых частей речи, список существительных, список прилагательных и причастий.

Список отношений не является исчерпывающим, может дополняться по мере необходимости. Предложенный подход может быть положен в основу серии стандартов по представлению семантических данных о геопространстве.

Рассмотрена задача *извлечения знаний* и даны предложения по ее решению. Знания о геопространстве могут использоваться при вводе данных, в процессе логического вывода и генерации картографических изображений автоматом.

При представлении знаний наиболее эффективно использование квантифицированных формул вида

$$\begin{aligned} &\forall o(P(t, s) \wedge T(t, o) \rightarrow P(o, s)), \\ &\exists t \exists o(P(t, s) \wedge T(t, o) \rightarrow P(o, s)), \end{aligned}$$

где $P()$ - отношение предикации, $T()$ - отношение таксономии. Использование подобных правил в процессе создания знаний о геопространстве избавляет от необходимости указания свойств *каждой* разновидности объектов. Аналогичным образом предложено использовать знания о структуре сложных объектов.

Для получения свойств и структуры эмпирических объектов предложено правило вывода *modus ponens*:

$$\frac{\Phi \rightarrow \Psi, \Phi}{\Psi}.$$

Утверждается, что СИГМа, основанные на знаниях, в своем развитии пройдут три этапа, характерных для экспертных систем: *системы-ассистенты*, *партнерские системы*, *системы-лидеры*, и что путь к дальнейшему развитию СИГМа лежит через интеграцию с *системами анализа данных*.

Раздел 4 содержит решение задачи представления картографических изображений (КИ) на основе формализации картографии. Разработанная формальная система по своей сути представляет собой алгебру картографических изображений. Формальный язык (*язык картографического отображения*) содержит средства описания КИ, средства манипулирования КИ, средства для определения соответствия между картографируемыми и картографическими объектами. При разработке языка картографического отображения в качестве базового языка предложено использовать язык программирования C++. Язык картографического отображения не является альтернативой C++ , это декларативный язык для описания, создания и распространения цифровых картографических изображений.

Формально картографическое отображение K определяется как *метаформула картографического отображения*

$$K : M \rightarrow W \quad (6)$$

где M – множество формул, описывающих объекты геопространства, W – множество формул для описания КИ.

В качестве основных графических переменных приняты *сигнатура, размер, ориентация, цвет, яркость, толщина* и *условный знак (УЗ)*. *Сигнатура* – геометрическая структура УЗ. Перечисленные сущности названы *графическими типами*, их имена должны быть *зарезервированными словами* языка картографического отображения. Каждый графический тип представляет собой конечное множество допустимых значений (домен) и операций над этими значениями. С каждым доменом связано имя и тело домена. *Имя типа графических данных* является именем соответствующего домена. *Тип графической переменной* указывается с помощью имени графического типа. *Тело домена* – множество элементов, каждый из которых является уникальным допустимым значением соответствующего типа – *графической константой*.

Среди перечисленных изобразительных средств наиболее значимой является *сигнатура* - *носитель* прочих изобразительных свойств. Чтобы упростить сравнение различных сигнатур, предложено их представление в *нормированном* виде. Конкретная сигнатура, полученная из нормированной с помощью линейных преобразований, есть *экземпляр сигнатуры*. Экземпляр сигнатуры однозначно определяется идентификатором сигнатуры и параметрами, определяющими ее трансформацию, и трактуется как графическая константа.

По своей структуре сигнатуры разделяются на *простые (элементарные, сигнатуры-примитивы)* и *составные (сигнатуры-комплексы)*. В качестве сигнатур-примитивов определены: точка, пробел, отрезок, ломаная, окружность, дуга окружности, дуга параболы, гладкая кривая, квадрат, треугольник, многоугольник, круг, сектор и сегмент круга. Для конструирования сигнатур любой сложности из примитивов или созданных ранее сигнатур-комплексов предложены двухместные операции *сложения, вычитания, умножения* и одноместная операция *дополнения сигнатуры*, определяемые соответственно как

$$(C = A + B) \equiv (\forall x : (x \in C) \rightarrow (x \in A \vee x \in B));$$

$$(C = A - B) \equiv (\forall x : (x \in C) \rightarrow (x \in A \wedge x \notin B));$$

$$(C = A * B) \equiv (\forall x: (x \in C) \rightarrow (x \in A \wedge x \in B));$$

$$(C = -A) \equiv (\forall x: (x \in C) \rightarrow (x \in U \wedge x \notin A)).$$

Перечисленные операции над сигнатурами названы *структурными*, так как выполняются над ее структурой; их общий формат определен как

$$S = S_1 @ S_2,$$

где @ - символ структурной операции, а S_1 и S_2 - сколь угодно сложные выражения из символов сигнатур и символов структурных операций.

Общий формат *линейных операций* над сигнатурами имеет вид

$$S @ a,$$

где S – сигнатура, @ - символ линейной операции над сигнатурой, a – арифметическое выражение. В качестве линейных операций над сигнатурами приняты:

* - масштабирование (изменение обеих координат в a раз);

↑ - растяжение в a раз по оси X ;

→ - растяжение в a раз по оси Y ;

^ - смещение на величину a по оси X ;

> - смещение на величину a по оси Y ;

↑↑ - перенос сигнатуры в точку $X=a, Y=Y$;

⇒ - перенос сигнатуры в точку $X=X, Y=a$;

∠ - наклон на величину a , равную тангенсу угла;

° - поворот на угол a по часовой стрелке;

% - зеркальное отражение относительно прямой, расположенной под углом a к оси X .

Выражение, содержащее операции над сигнатурами, названо *сигнатурным*, его значением является сигнатура. Результат структурных операций - *новый тип сигнатуры*, результат линейных операций – *новый экземпляр сигнатуры*.

С целью расширения возможностей языка картографического отображения, кроме *непараметризуемых* сигнатур, введены сигнатуры *параметризуемые*.

Делению УЗ на точечные, линейные, полосные и площадные соответствует аналогичное разбиение сигнатур. Принципиально различаются *точечные и линейные сигнатуры*. *Площадные и полосные сигнатуры* представляют собой конструкции из точечных и линейных сигнатур.

Существенным отличием линейных сигнатур от точечных является их периодичность, в связи с чем предложены циклы с неопределенным числом повторений с постфиксной и префиксной нотацией.

Сигнатуры границ площадных объектов не отличаются от линейных сигнатур. Семантика площадного объекта может передаваться с помощью надписи, заливки, штриховки и точечных УЗ, рассредоточенных по области, занятой площадным объектом, либо комбинацией перечисленных способов. *Параметрами штриховки* (графическими переменными) являются: линейные сигнатуры, их толщина, расстояние между ними и ориентация.

Полосные сигнатуры являются наиболее сложными по своей структуре. Для изображения левой и правой границ полосного объекта нередко использу-

ются разные сигнатуры с целью отображения неоднородности полосных объектов и их направленности. Область полосного объекта может закрашиваться, оставаться пустой, заполняться точечной или линейной сигнатурой.

Размещение *заполняющей сигнатуры* осуществляется по некоторому закону: в узлах сетки квадратов, в шахматном порядке, по окружностям и т. п. Размещение одной сигнатуры по другой невидимой сигнатуре является часто используемым способом. Невидимая структура названа *сигнатурой-носителем* и к ней могут применяться линейные и структурные операции.

Классификаторы топографической информации обычно дополняются документом “*Правила цифрового описания объектов*”, содержащим соглашения о порядке представления данных и являющимся причиной несовместимости различных ГИС. В качестве альтернативы правилам описания объектов предложены *темплеты* – машинные аналоги образов объектов геопространства в памяти человека. Дано представление возможных топологических отношений между двумя объектами на поверхности. Использование темплетов повышает качество геоинформационных моделей на основе программного контроля.

Элементарный УЗ представляет собой сочетание сигнатуры и других изобразительных средств. *Абстрактный элементарный УЗ Z* суть комбинация, или произведение *графических переменных*

$$Z = S \times M \times O \times C \times I \times T .$$

Конкретный УЗ есть произведение

$$z = s \times m \times o \times c \times i \times t ,$$

где символы z, s, m, o, c, i, t – графические константы.

Более удобным решением представляется такое, когда УЗ рассматривается как множество, а не упорядоченное множество. Тогда любая перестановка констант s, m, o, c, i и t будет представлять собой один и тот же УЗ.

Предметные переменные C, I и T , названные *декоративными*, можно объединить в переменную *перо* $P = C \times I \times T$, что повышает эффективность представления данных в ЭВМ. В результате приписывания сигнатурам цвета, яркости и толщины они трансформируются в элементарные условные знаки. Операция переноса свойств пера на сигнатуру названа *раскрашиванием сигнатуры*.

Остальные элементы УЗ Z объединяются в группу, названную *знаковой сигнатурой* и обозначаемой символом $G = S \times M \times O$, где $M = L \times B$. Тогда элементарный УЗ Z может быть представлен как $Z = G \times P$.

Составной условный знак определяется как композиция, или сумма

$$Z = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n = \sum_{i=1}^n Z_i , \quad (7)$$

где Z – составной условный знак, Z_i – выражение, называемое *компонентой условного знака*, членом или *слагаемым* и обозначающее условный знак. Выражения, составленные из имен графических переменных, имен УЗ и операций комбинации изобразительных средств и композиции условных знаков названы *знаковыми* или *графическими*. Первая из операций служит для создания конструкций из *разнородных*, вторая – *однородных* элементов условного знака.

Значением графического выражения всегда является конкретный УЗ – *графическая константа*. Знаковое выражение, не содержащее операции композиции условных знаков, называется *простым графическим выражением* или *графическим одночленом*. Графическое выражение, имеющее вид (7), определено как *графический многочлен*.

Надписи - наиболее универсальное и наименее наглядное изобразительное средство. Для надписей применение сигнатур наиболее показательно: каждый символ является сигнатурой. Каждый конкретный шрифт устанавливает соответствие между множеством символов и множеством сигнатур.

Как изобразительное средство надписи характеризуются содержанием текста, шрифтом, размером, наклоном, цветом, ориентацией и другими параметрами. Все перечисленные свойства надписей являются графическими переменными и используются для передачи семантики тогда, когда такая передача осуществляется с помощью *одной* надписи. Несколько надписей, относящихся к одному объекту, группируются в конструкцию - *область характеристик*, или несколько конструкций. Область характеристик делится на *поля характеристик*, в каждом из которых может быть размещена одна надпись. В работе даны графические переменные, характеризующие параметры отдельных надписей и области характеристик. Таким образом, использование надписей не отличается от использования УЗ.

Картографическое изображение. На вход системы картографического отображения (СКО) поступает множество сигнатур, множество условных знаков, система правил картографического отображения, знания о предметной области и геоинформационная модель. Совокупность описаний сигнатур, УЗ и правил картографического отображения образуют *базу картографических знаний* (рис.2). Задача системы картографического отображения состоит в том, чтобы каждому отображаемому объекту на основании его свойств и правил картографического отображения поставить в соответствие определенный условный знак и сконструировать в рабочей области модель изображения.

В первоначальном виде сигнатура карты представляет собой копию геометрической компоненты геоинформационной модели - контурную карту. Задача получения сигнатуры карты в окончательном виде сводится к преобразованию графа последовательной заменой одного подграфа другим. Основную трудность при преобразовании сигнатуры карты представляет *разрешение конфликтов* - выбор одной сигнатуры из нескольких кандидатов и исключение или смещение сигнатур условных знаков и надписей. Правила разрешения конфликтов определяются на основе *отношения доминирования*.

Вторая часть задачи построения КИ состоит в *сопряжении сигнатур* КИ между собой.

В результате анализа содержания геоинформационной модели и правил картографического отображения для каждого объекта в процессе программного построения КИ должна быть создана структура V – *локализованный условный знак*, представляющая собой произведение

$$V_i = (X \times Y)_i \times Z_i,$$

где $X \times Y$ – локус условного знака, Z – условный знак.

Картографическое изображение W представляется как многочлен

$$W = V_1 + V_2 + \dots + V_n = \sum_{i=1}^n V_i . \quad (8)$$

При преобразовании КИ с целью оптимизации их представления в ЭВМ могут использоваться такие свойства многочлена (8) как *коммутативность*, *ассоциативность* и *дистрибутивность*. Наряду с этими свойствами правилами преобразования являются *правило подстановки*, *приведения подобных членов* и *разрешения конфликтов*. Назначение правил – определение множества допустимых формальных операций КИ.

Множество объектов M , как формальная модель предметной области, представляет собой объединение некоторых элементов

$$M = \bigcup_{i=1}^{|M|} t_i ,$$

где t_i - *тип* отображаемых объектов. Соответствие между типом объекта и элементарным УЗ устанавливается с помощью выражений вида:

$$(T == \tau_i \wedge D_{ij} == d_{ijk}) \rightarrow \\ \rightarrow (S = s_k \wedge M = m_k \wedge O = o_k \wedge C = c_k \wedge I = i_k \wedge T = t_k)'$$

где T - предметная переменная “тип объекта”, τ - константа, обозначающая тип объекта, D – предметная переменная, обозначающая свойство, d – значение свойства, S, M, O, C, I и T - графические переменные, s, m, o, c, i и t – графические константы; $==$ - символ операции сравнения “равно”, $=$ - операция присваивания.

Представление картографических знаний. СКО, основанные на правилах, должны включать четыре обязательных компонента: *базу знаний о предметной области*; *базу геопространственных данных*; *базу картографических знаний*; *интерпретатор*, осуществляющий построение КИ на основе логического вывода с использованием набора правил.

База картографических знаний должна содержать описания сигнатур, описания условных знаков и систему правил картографического отображения. Совокупность правил представляет собой систему продукций вида “если..., то...”.

Построение модели КИ выполняется в виде многократного повторения процедуры “понимание - выполнение”. Понимание в каждом цикле сводится к отождествлению состояния части геопространственных данных, представляющих собой объект некоторого типа и его свойства, с антецедентом одного из правил. Если в некотором цикле отождествление произошло успешно, то осуществляется формирование локализованного УЗ. По завершении логического вывода содержимое рабочей области оказывается в частично готовом состоянии. Для его приведения к окончательному виду требуется разрешить конфликты и выполнить сопряжение сигнатур условных знаков.

Таким образом, получение КИ в системе, основанной на знаниях, сводится к представлению картографических знаний и реализации механизма логическо-

го вывода, создающего модель КИ. Такая организация систем картографического отображения позволяет придать им гибкость, и на ее основе достичь универсальности, поскольку с одним механизмом логического вывода могут использоваться различные наборы правил, в результате чего появляется возможность автоматически создавать карты различного тематического содержания.

Каждому отображаемому на карте или плане типу объектов может быть поставлено в соответствие одно или несколько правил в базе знаний. Каждое правило, представляющее собой имплицативное высказывание, разделяется на два высказывания: антецедент и консеквент. Представление каждого высказывания основывается на их субъектно-предикатной структуре, что является естественным решением. Антецедент каждого простого правила может быть представлен отношением $A(s, x, o, z)$, где s – субъект высказывания (тип геопространственных объектов); x – наименование свойства объекта; o – оператор отношения ($<, \leq, =, \neq, >, \geq, \in, \notin$); z – значение свойства.

Посылки картографических правил часто являются сложными дизъюнктивными и/или конъюнктивными высказываниями, и возникает проблема представления в базе картографических знаний сложных высказываний, известная в теории искусственного интеллекта как проблема представления И/ИЛИ-деревьев, решаемая их заменой эквивалентными двоичными деревьями.

Представление консеквента каждого правила осуществляется проще, поскольку каждой посылке правила соответствует только одно заключение.

Использование знаний в системах картографического отображения основано на применении формального аппарата логики, в которой выделяют два принципиально различных способа вывода: дедуктивный и индуктивный. Основными способами дедуктивного вывода в системе картографического отображения являются простые силлогизмы и правило *modus ponens*.

Индуктивные умозаключения не имеют столь принципиального характера, но в дальнейшем могут дать определенные преимущества. Система, способная на индуктивные умозаключения, может применяться при проектировании карт. Индуктивные умозаключения о содержании карты, основанные на анализе других карт, – это рассуждения по аналогии, действия на основе прецедентов. Важна не столько степень разумности *программы проектирования карт*, сколько ее способность повышать производительность человеко-машинной системы.

В заключении кратко формулируются основные результаты исследований, представленных в настоящей работе.

По проблеме *представления геопространства в целом* на основе линейного отображения: дана новая удобная интерпретация одних и впервые установлен геометрический смысл некоторых других величин в сфероидической геодезии; впервые выявлена аналогия между формулами сферической геодезии и соотношениями между величинами на эллипсоиде вращения; получено новое решение главных геодезических задач на эллипсоиде в виде замкнутой системы точных формул; выведены новые эффективные и универсальные формулы для *вычисления длин дуг* плоских центральных сечений эллипсоида и геодезических линий с топографической и геодезической точностью.

Выбор эллипсоида вращения в качестве модели геопространства в целом является эффективным решением проблемы интеграции геопространственных данных для сколь угодно больших территорий.

Таким образом, в области представления координатного пространства получены новые решения, во-первых, представляющие практическую значимость в силу их эффективности по сравнению с известными решениями; во-вторых, свидетельствующие о продуктивности использованного подхода к решению задач на эллипсоиде и, как следствие, его научном (методологическом) значении для теории сфероидической геодезии.

По проблеме *моделирования топографических поверхностей* получены новые эффективные решения всех основных задач: предложены меры сложности кривых и топографических поверхностей; разработан метод создания регулярных кусочно-непрерывных моделей с применением сплайнов на подпространстве; установлены условия различной гладкости кусочно-непрерывных функций одной и двух переменных, заданных значениями на регулярной сетке, и их производных и на этой основе разработан способ построения более плотных регулярных моделей различной гладкости; получено компактное представление плоской триангуляции; разработаны волновые алгоритмы создания нерегулярных моделей, характеризующиеся линейной вычислительной сложностью; разработаны метод представления неоднозначных топографических поверхностей и пространственные волновые алгоритмы для построения их моделей.

Таким образом, в области моделирования топографических поверхностей разработаны эффективные структуры данных и алгоритмы, обеспечивающие возможность представления и построения моделей топографических поверхностей любой сложности, что имеет практическую и научную значимость.

По проблеме *моделирования дискретных объектов* предложена типология объектов геопространства и впервые разработаны: функциональная структура систем информационного геомоделирования, основанных на знаниях; структура и содержание геопространственных знаний в виде семантической сети; метод кодирования терминов предметной области; методы использования геопространственных знаний.

Разработанные структура геопространственных знаний и способ кодирования терминов предметной области позволяют: избавиться от контекстной зависимости и достичь полной однозначности представления и интерпретации семантических данных; избавить принимающую систему от необходимости знания классификации объектов в системе - отправителе; избавиться от необходимости указания для каждого объекта в базе данных его места в системе классификации; создать необходимые и достаточные условия формирования единого семантического пространства и интеграции СИГМа различной тематической направленности; сократить объемы геопространственных данных и знаний и получать знания, представленные имплицитно, с помощью *логического вывода*.

Таким образом, по проблеме моделирования дискретных объектов с применением методов искусственного интеллекта получено решение важной акту-

альной проблемы представления семантической информации (практическая значимость), что создает прецедент и основу дальнейших работ в направлении интеллектуализации СИГМа (научная значимость).

По проблеме *представления картографических изображений* впервые:
- разработана функциональная структура систем картографического отображения, основанных на знаниях; с применением методов дедуктивной формализации содержательных теорий разработана формальная система в виде алгебры картографических изображений; разработана структура картографических знаний в виде продукционной системы; разработаны методы использования картографических знаний в виде дедуктивных и индуктивных выводов; предложен язык картографического отображения, назначение которого - использование в качестве языка публикаций, при коммуникации между картографом и ЭВМ, при межсистемном обмене картографическими изображениями.

Таким образом, по проблеме представления картографических изображений получены результаты, представляющие собой логическое продолжение решений по разработке СИГМа, основанных на знаниях, что является перспективным направлением в геоинформатике и имеет как практическую, так и научную значимость.

Рекомендации по использованию результатов работы. Результаты, полученные в области представления координатного пространства, моделирования топографических поверхностей, моделирования дискретных объектов геопространства и построения картографических изображений заслуживают включения в планы НИР и ОКР Роскартографии с целью дальнейшего развития и доведения до уровня государственных геоинформационных стандартов.

Список научных работ, содержащих основные положения диссертации
Монография “Основы конструирования систем геомоделирования” в двух книгах. Книга 1. Теоретические основы информационного геомоделирования. Часть 1 [Текст]: монография – Новосибирск: СГГА, 2008. – 196 с. Часть 2 [Текст]: монография – Новосибирск: СГГА, 2008. – 288 с. Книга 2. Информационное геомоделирование: модели и методы. Часть 1 [Текст]: монография – Новосибирск: СГГА, 2008. – 315 с. Часть 2 [Текст]: монография – Новосибирск: СГГА, 2008. – 316 с.;

Работы, опубликованные по теме диссертации в изданиях, входящих в Перечень изданий, определенных ВАК Минобрнауки РФ

1. Кравченко Ю. А. Технологии создания цифровых топографических карт. [Текст] Геодезия и картография, 1996, № 3, С. 43-47.
2. Кравченко Ю. А. Цифровое картографирование: что унифицировать? [Текст] Геодезия и картография, 1999, № 2, С. 3-7.
3. Кравченко Ю. А. Об интерпретации и обозначении параметров в сфероидической геодезии. [Текст] Геодезия и картография, 2000, № 4, С. 25-28.
4. Кравченко Ю. А. Вычисление длины дуги меридиана. [Текст] Геодезия и картография, 2000, № 5, С.8-12.

5. Кравченко Ю. А. Интерпретация параметров эллипса с позиций проективной геометрии. [Текст] Геодезия и картография, 2000, № 10, с.18-25.
6. Кравченко Ю. А. Смежные дисциплины и предмет геоинформатики. [Текст] Геодезия и картография, 2001, №3, с.44-50.
7. Кравченко Ю. А. Решение главной геодезической задачи на эллипсоиде. [Текст] Геодезия и картография, 2002, № 2, с.45-51.
8. Кравченко Ю. А. Анализ классификатора топографической информации. [Текст] Геодезия и картография, 2002, № 3, с.13-17.
9. Кравченко Ю. А. Организация базы знаний о земной поверхности. [Текст] Геодезия и картография, 2002, № 4, с.42-54.
10. Кравченко Ю. А. О типологии объектов геоинформационного моделирования. [Текст] Геодезия и картография, 2002, № 7, с. 48-55.
11. Кравченко Ю. А. Об исчислении картографических изображений и языке картографического отображения. [Текст] Геодезия и картография, 2002, № 10, с. 34-46.
12. Кравченко Ю. А. Использование знаний в системах картографического отображения. [Текст] Геодезия и картография, 2004, № 12, с. 36 - 44.
13. Кравченко Ю. А. Волновые алгоритмы построения плоской триангуляции. [Текст] Геодезия и картография, 2005, № 2, с. 25 - 32.
14. Кравченко Ю. А. Вычисление длин дуг плоских сечений эллипсоида. [Текст] Геодезия и картография, 2010, № 4, с. 15 – 19
15. Кравченко Ю. А. Представление и создание моделей неоднозначных топографических поверхностей. [Текст] Геодезия и картография, 2010, № 7, С 11-15.
16. Кравченко Ю, А. О решении проблемы интенсификации обращения геоинформации. [Текст] Геодезия и картография, 2011, № 3, С. 45-51.

Работы в прочих изданиях:

17. Кравченко Ю. А. О возможности автоматизации кодирования семантической информации. [Текст] Сб. научн. тр. НИИПГ, Вып. 6. Автоматизация крупномасштабного картографирования М., 1982, с. 91-103.
18. Кравченко Ю. А. Методы моделирования топографических поверхностей. Обзорная информация [Текст] ЦНИИГАиК, 1984, -68 с.
19. Кравченко Ю. А. Определение структурных линий и точек топографических поверхностей. [Текст] Сб. научн. тр. НИИПГ, Вып. 8, М.: ЦНИИГАиК, 1985, с. 117-123.
20. Кравченко Ю. А. К вопросу о выборе цифровой модели высот. [Текст] Вопросы картографии. Межвузовский сб. Новосибирск, 1985, с. 17-24.
21. Кравченко Ю. А. Моделирование топографических поверхностей с помощью интерполяционных сплайнов на подпространстве. [Текст] Сб. научн. тр. НИИПГ, Вып. 20, Автоматизация крупномасштабного картографирования. М.: ЦНИИГАиК, 1985, с. 42-51.
22. Кравченко Ю. А. Волновой алгоритм построения триангуляционного покрытия. [Текст] Сб. научн. тр. НИИПГ, Вып. 11, Крупномасштабные топографические съемки. -М.: ЦНИИГАиК, 1987, с. 51-59.
23. Кравченко Ю. А. Проблема цифрового картографирования: от обработки данных к обработке знаний. [Текст] Научн.-техн. сб. по геодезии, аэрокосмиче-

- ским съемкам и картографии. Исследования в области цифрового картографирования, ГИС-технологий и кадастра. –М., ЦНИИГАиК, 1995, с. 24-32.
24. Кравченко Ю. А. Потребности пользователей: цифровые карты или цифровые модели? [Текст] Материалы 3-ей уч.-практ. конф. “Проблемы ввода и обновления пространственной информации”. Ч. I. - М., 1998, с. 65-69.
25. Кравченко Ю. А. Структура и функции интегрированной ГИС. [Текст] Мат. Международ. конф. INTERCARTO 4. ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий. – Барнаул, 1998, с. 85-91.
26. Кравченко Ю. А. О содержании проекта стандарта “Метаданные электронных карт”. [Текст] Инф. бюллет. ГИС-Ассоциации, 1999, № 1 (18), с. 22-23.
27. Кравченко Ю. А. Об истории и проблемах “цифрового картографирования” в России. [Текст] Информ. бюллет. ГИС-Ассоциации, 2003, № 3 (40), с. 50-52, № 4 (41), с. 48-49, 66.
28. Кравченко Ю. А. Компактное представление плоской триангуляции. [Текст] Изв. ВУЗов. Строительство. 2008, № 4, С. 99 – 103.
29. Кравченко Ю. А. Оценка сложности плоских кривых и топографических поверхностей. [Текст] Изв. ВУЗов. Строительство. 2008, № 6, с. 99 – 104.
30. Кравченко Ю. А. Темплеты – альтернатива правилам цифрового описания объектов. [Текст] Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2009, № 1, С. 106-110.