

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Самсонов Тимофей Евгеньевич

**Генерализация пространственных данных
и ее картографические приложения**

1.6.20 — Геоинформатика, картография

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора географических наук

Москва — 2025

Диссертация подготовлена на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

**Официальные
оппоненты:**

Лисицкий Дмитрий Витальевич,
доктор технических наук, профессор,
директор научно-исследовательского института стратегического развития, профессор-консультант кафедры картографии и геоинформатики ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»

Погорелов Анатолий Валерьевич,
доктор географических наук, профессор,
профессор кафедры геоинформатики института географии, геологии, туризма и сервиса ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»

Тикуннов Владимир Сергеевич,
доктор географических наук, профессор,
заведующий научно-исследовательской лабораторией комплексного картографирования, профессор кафедры географии мирового хозяйства географического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

Защита диссертации состоится 22 мая 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета МГУ.016.4 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

E-mail: dissovet.geogr.msu@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М. В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3365>

Автореферат разослан 20 марта 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук

Е. Ю. Матлахова

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Картографическая генерализация представляет собой отбор, обобщение, выделение главных типических черт изображаемых объектов в соответствии с назначением, масштабом, содержанием карты, особенностями картографируемой территории и самого объекта [Салищев, 1976; Берлянт, 2014]. При использовании геоинформационных технологий карты составляются на основе *пространственных данных*, под которыми понимаются данные о пространственных объектах — *цифровых моделях* материальных или абстрактных объектов реального или виртуального мира с указанием их идентификаторов, координатных и атрибутивных данных [ГОСТ Р 57657-2017, 2018]. Таким образом, задача картографической генерализации решается путем *генерализации пространственных данных* — обобщения позиционных [координатных] и атрибутивных данных о пространственных объектах в ГИС в автоматическом или интерактивном режиме с использованием операторов генерализации, их наборов или последовательностей, часть из которых имеет соответствие в приемах и методах картографической генерализации [Геоинформатика, 1999].

Географические принципы обобщения карт, связанные с учетом закономерностей организации явлений в разных пространственных масштабах, трудно формализуемы, и в силу этого существующие подходы к генерализации пространственных данных реализуют их лишь частично. Требуется углубление географической содержательности методов генерализации, а также адаптация ее концептуального и технологического аппарата к оперированию цифровыми моделями географических объектов. Решение этой проблемы представляет собой важную и актуальную научную задачу в области геоинформатики и географической картографии.

Объект исследования — пространственные данные как совокупность цифровых моделей географических объектов.

Предмет исследования — методы генерализации пространственных данных для создания карт разных масштабов и мультимасштабных карт.

Цель исследования — разработка автоматизированных методов генерализации пространственных данных, обеспечивающих воспроизведение географических особенностей картографируемых объектов, представленных в исходных цифровых моделях, а также достижение необходимого уровня их детализации и создание мультимасштабных карт.

Для достижения цели потребовалось решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ современного состояния теории, методов и технологий картографической генерализации; выделить особенности генерали-

зации пространственных данных для целей картографирования, а также проблемы, обуславливающие их развитие в части адаптивных подходов, детальности и мультимасштабного картографирования.

2. Разработать методики адаптации процессов генерализации пространственных данных к распределению, структуре, форме и отношениям географических объектов, которые могут быть выявлены по их цифровым моделям.
3. Предложить подходы к оценке детальности пространственных данных, управлению детальностью при генерализации пространственных данных, а также интеграции пространственных данных различной детальности для целей картографирования.
4. Определить теоретические и методологические основания мультимасштабного картографирования (МК), обосновать принципы построения баз данных и преобразований способов изображения на мультимасштабных картах.
5. Выполнить реализацию разработанных подходов на разнообразных картографических примерах.

Методология и методы исследования. В основе исследования лежит цифровое моделирование географических объектов. Разработанные методики генерализации опираются на предположение о том, что исходные пространственные данные достоверно описывают моделируемые объекты, что позволяет оценивать качество их генерализации путем сравнения результатов с начальным состоянием. Выявление пространственных закономерностей организации географических объектов опирается на реализацию приемов картографического метода исследования посредством геоинформационных технологий и их применение к цифровым моделям. Для решения задач исследования выполнялась разработка и применение специализированного программного обеспечения, картографическая визуализация исходных и генерализованных пространственных данных, качественный и количественный (в том числе статистический) анализ полученных результатов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. *Генерализация пространственных данных для целей картографирования* опирается на принципы адаптивности, детальности и мультимасштабности. Применение данных принципов позволяет реализовать учет таких факторов генерализации как особенности картографируемых объектов, необходимый уровень детализации выходных данных (в том числе определяемый масштабом карты), а также интерактивность среды их визуализации при работе с цифровыми моделями географических объектов.

2. *Адаптивность* генерализации пространственных данных обеспечивает сохранение и воспроизведение пространственного распределения, пространственных отношений, характера формы и основных структурных элементов картографируемых объектов, а также соотношения их площадей, представленных в исходных цифровых моделях. Реализация принципа адаптивности основывается на включении в геоинформационные алгоритмы генерализации операций морфометрического, сетевого, оверлейного и статистического анализа, а также вспомогательных разбиений пространства, определяемых множеством генерализуемых объектов.
3. *Детальность* пространственных данных в геометрической части определяется характеристиками цифровых моделей географических объектов, которые монотонно изменяются в процессе их генерализации. Направленное воздействие на эти характеристики с помощью операторов генерализации позволяет достигать требуемой детальности картографического изображения, а моделирование этих характеристик дает количественные оценки детальности и возможность ее управляемого изменения. Согласование данных разной детальности осуществляется с помощью конфляции (совмещения) их соответствующих элементов, а их взаимная координатная привязка — с использованием методов компьютерного зрения.
4. *Мультимасштабность* картографического изображения обеспечивается интерактивным откликом процессов генерализации пространственных данных и преобразования графических средств и способов изображения на изменение масштаба карты. Анимации переходов между масштабными уровнями карты позволяют явным образом визуализировать геометрические и атрибутивные преобразования пространственных данных и повысить информативность мультимасштабных карт.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

1. Сформулированы основные принципы генерализации пространственных данных для целей картографирования: адаптивность, детальность и мультимасштабность.
2. Разработано понятие адаптивной генерализации пространственных данных. Предложен и реализован ряд практических методов и алгоритмов генерализации, реализующих принципы адаптивности.
3. Получен комплекс методик оценки, управления и интеграции для пространственных данных и карт в контексте их детальности. Введено и исследовано понятие гранулярности цифровых моделей рельефа как ключевой геометрической характеристики их детальности.

4. Сформулированы основные положения мультимасштабного картографирования (МК) как нового направления картографии. Показана их практическая применимость в задачах общегеографического, физико-географического и социально-экономического картографирования.
5. Созданы новые уникальные наборы данных: глобальная мультимасштабная цифровая модель высот NYP50 для мелкомасштабного гипсометрического картографирования; база данных характеристик подстилающей поверхности и геометрии городских каньонов Московского региона.

Практическая значимость. Результаты работы применимы в широком спектре географических исследований, связанных с построением общегеографических и тематических карт. Предложенные методы позволяют снизить субъективный фактор при выполнении процедур генерализации и построения мультимасштабных карт, ускорить решение соответствующих задач. Разработанные автором программные средства размещены в открытом доступе в репозитории *GitHub* и могут быть использованы для решения практических задач обработки пространственных данных, а также в образовательных целях.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- использованием численных и графоаналитических методов для оценки геометрической точности и географического правдоподобия результатов, получаемых каждым из разработанных методов генерализации;
- экспертными оценками отдельных результатов методом визуального сравнения с образцами аналогичных карт ручного составления, а также методом экспертного опроса;
- строгостью используемых математических методов;
- апробацией результатов на международных и российских научных мероприятиях, а также их публикацией в ведущих (в том числе, высокорейтинговых) журналах, соответствующих тематике диссертации.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на ряде научных мероприятиях по теме диссертации: XXV-XXXI Международных картографических конференциях (Париж, 2011; Дрезден, 2013; Рио-де-Жанейро, 2015; Вашингтон, 2017; Токио, 2019; Флоренция, 2021; Кейптаун, 2023); 7-й и 8-й Международной конференции по геоинформатике GIScience (Коламбус, 2012; Вена, 2014); 19-м и 24-м Международном симпозиуме по автоматизированной картографии AutoCarto (Коламбус, 2012; Редландс, 2022); 34-м Международном географическом конгрессе (Стамбул, 2021); Региональной конференции Международного географического союза (Москва, 2015); 9-м, 11-м и 12-м совещании Комиссии по горной картографии Международной картографической ассоциации (Банфф, 2014; Хвар, 2018; Сноу-Ранч, 2023); 18-м и 19-м и 23-м совещании Комиссии по генерализации и множествен-

ным представлениям Международной картографической ассоциации (Дрезден, 2014; Хельсинки, 2016; Делфт, 2020); 3-м Международном симпозиуме по геоморфометрии (Редландс, 2011); II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Цифровая география» (Пермь, 2024), 1-й и 2-й Национальных картографических конференциях (Москва, 2016, 2018); III и V Всероссийской научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование» (Санкт-Петербург, 2019, 2024); 18-й и 27-й международной конференции Интеркарто/ИнтерГИС (Смоленск, 2012; Апатиты, 2021); 1-й, 3-й и 11-й Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформационное картографирование в регионах России» (Воронеж, 2009, 2013, 2020); XIV-XIX и XXII Международных конференциях пользователей Esri в России и СНГ (Голицыно, 2008, 2009, 2010; Поведники, 2011, 2012, 2013, 2016); XXXIII Пленуме Геоморфологической Комиссии РАН (Саратов, 2013); Летних школах Лаборатории дискретной и вычислительной геометрии имени Б. Н. Делоне ЯрГУ (Ярославль, 2012, 2013); I и II Международных форумах молодых ученых «Наука будущего — наука молодых» (Севастополь, 2015; Казань, 2016); V Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А. П. Карпинского (Санкт-Петербург, 2017); Всероссийской конференции «Ломоносовские чтения» (Москва, 2018); Международной научно-технической конференции «Пространственные данные — основа стратегического планирования, управления и развития» (Москва, 2019).

Результаты исследования были обсуждены на семинарах кафедр картографии и геоинформатики Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ), Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ), Сибирского государственного университета геоинформатики и технологий (СГУГиТ), кафедры картографии Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), кафедры геоинформатики Кубанского государственного университета (КубГУ).

На основе опыта многолетних исследований по тематике диссертационного исследования автором разработаны и внедрены в учебный процесс курсы «*Картографические базы данных*» (читался с 2014 по 2023 г.) и «*Генерализация пространственных данных*» (читается с 2024 г.) для студентов бакалавриата МГУ по направлению 05.03.03 «Картография и геоинформатика».

Фактический материал и личный вклад автора. В работе использованы открытые источники пространственных (базы пространственных данных, цифровые карты, цифровые модели рельефа, космические снимки) и статистических данных. Постановка проблемы, разработка методик и анализ результатов во всех исследованиях осуществлялись лично автором. Для 12 из 18

частных методик¹ (2/3 от общего объема) автором также выполнена их техническая (в т.ч. программная) реализация и непосредственно генерализация пространственных данных.

Публикации. Соискатель имеет 33 опубликованных работы по теме диссертации, включая 23 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования «eLibrary Science Index». Получено 4 свидетельства о регистрации прав на программное обеспечение. В материалах российских и международных конференций опубликовано 20 работ. Участие соискателя во всех опубликованных работах является значительным, конкретный вклад обозначен в списке работ. В работах, где соискатель идет первым автором или имеет вклад более 50% (19 работ из 23 в изданиях, рекомендованных для защиты), его роль была определяющей при подготовке публикации, включая написание текста, составление графических материалов, предоставление статьи в редакцию и прохождение рецензирования. При подготовке диссертации использованы тексты всех 23 публикаций в изданиях, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (617 наименований, из них 535 на иностранном языке) и приложения. Объем работы составляет 526 страниц, включая 198 иллюстраций и 32 таблицы. Количество томов диссертации — 2.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам кафедры картографии и геоинформатики д.г.н. В. И. Кравцовой, к.г.н. С. В. Чистову, к.г.н. С. М. Кошелю и д.т.н. М. В. Нырцову за обстоятельное и плодотворное обсуждение диссертации, внимательное ознакомление с ее текстом и авторефератом, конструктивные замечания. Автор глубоко признателен своим университетским учителям — к.г.н. С. М. Кошелю, под руководством которого он выполнил свои первые исследования и дипломную работу по автоматизации в картографии; д.г.н., профессорам А. М. Берлянту и И. К. Лурье, при поддержке и под руководством которых была подготовлена кандидатская диссертация автора, заложившая основы настоящего исследования.

Целый ряд задач в настоящей работе был решен совместно с к.ф.-м.н. О. П. Якимовой, которой автор благодарен за многолетнее плодотворное сотрудничество в исследованиях по геометрическим алгоритмам генерализации. Исследование по полимагистральям выполнено совместно с к.г.н. Е. А. Прохоровой. Важное место в диссертации занимают гидрометеорологические приложения генерализации пространственных

¹ во всех разделах кроме 2.1-2.4, 3.7, 4.2

данных, которые были осуществлены благодаря сотрудничеству с к.г.н. М. И. Варенцовым, к.г.н. П. И. Константиновым и к.ф.-м.н. С. А. Мысленковым. Автор также признателен студентам и аспирантам, совместно с которыми был получен ряд результатов: А. А. Шурыгиной, А. М. Семенковой (Кривошеиной), Н. Д. Юровой-Доронкиной, А. С. Подольскому, А. Р. Высоцкой (Халиуллиной), Д. О. Вальтеру, Э. А. Усмановой, А. Р. Мухаметшину и Г. А. Карташову.

Особую благодарность автор хочет выразить своей *Alma Mater* — географическому факультету МГУ и кафедре картографии геоинформатики, в дружеской атмосфере которых он сформировался как географ и ученый-исследователь. Вместе с тем, своим техническим уровнем автор во многом обязан опыту, полученному в бытность старшим экспертом по серверным геоинформационным системам в компаниях Дата+ и ESRI CIS в 2008-2011 гг.

Работа выполнена при поддержке грантов МК (793.2013.5, 4829.2016.5), РФФИ (12-05-31318-мол_а, 14-05-00888-а, 15-07-06789-а, 18-07-01459), РГО (21/2016-Р) и РНФ (19-77-00071). Оригинал-макеты диссертации и автореферата подготовлены с помощью открытого и бесплатного программного обеспечения Quarto, Pandoc, Zotero, Typst, XeLaTeX, R, RStudio и Positron.

Наконец, самая сердечная благодарность адресована моим родным и близким за поддержку на всех жизненных этапах.

Содержание работы

Введение

Во Введении представлена актуальность настоящего исследования. Сформулированы цель и задачи работы, защищаемые положения. Выявлена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Глава 1. Современное состояние проблемы

Впервые понятие генерализации было введено в академическую картографию немецким картографом М. Эккертом в начале 20-х годов XX века [Eckert, 1921]. 1940-70-е годы ознаменовались появлением ряда теоретических концепций [Салищев, Сухов, Филиппов, 1947; Ratajski, 1967; Morrison, 1974; Салищев, 1976]. Обусловленный практическими соображениями уклон в автоматизацию, начавшись с формулировки базовых эмпирических закономерностей отбора объектов [Töpfer, Pillewizer, 1966] и компьютерных методов геометрического упрощения [Douglas, Peucker, 1973; Rosenfeld, Johnston, 1973] стимулировали появление в 1980-е годы более технических концепций генерализации, ориентированных на применение вычислительных алгорит-

мов и обработку пространственных данных [Nickerson, Freeman, 1986; Brassel, Weibel, 1988; McMaster, Shea, 1988; McMaster, Monmonier, 1989]. Комплексность процесса генерализации, попытки его полностью автоматизировать, привели к разработке *моделей генерализации*, основанных на различных правилах и ограничениях, позволяющих выполнять обобщение карт как целостных цифровых продуктов [Buttenfield, McMaster, 1991; Müller, Lagrange, Weibel, 1995; Mackaness, Ruas, 2007; Burghardt, Duchene, Mackaness, 2014]. Вместе с тем, появились полезные обобщения существующих алгоритмов генерализации [Li, 2006; Yan, 2019], исследованы особенности генерализации аэрокосмических изображений [Кравцова, 2000], сформулированы основные положения генерализации геоизображений [Берлянт, 2006].

Усложнение теории и методов генерализации выявило необходимость более глубокой формализации соотношения географической реальности и ее цифрового представления. В дополнение к простейшим методам геометрического упрощения линий [Douglas, Peucker, 1973; Rosenfeld, Johnston, 1973; Li, Openshaw, 1992; Visvalingam, Whyatt, 1993] появились подходы к анализу формы объектов [Buttenfield, 1987; Buttenfield, 1991; Plazanet, Affholder, Fritsch, 1995; Weibel, 1996; Dutton, 1999] и основанные на них методы генерализации [Wang, Muller, 1993; Plazanet, Bigolin, Ruas, 1998; Wang, Müller, 1998; Mustiere, 2005; Zhang *et al.*, 2007], воспроизводящие характер формы, в частности зданий [Sester, 2005; Bayer, 2009; Haunert, Wolff, 2010], а также методы, сохраняющие особенности распределения объектов при отборе [Ai, Liu, 2002; Yan, Weibel, 2008; Weiss, Weibel, 2014; Karsznia, Weibel, 2018] и их пространственные (топологические) отношения [de Berg, van Kreveld, Schirra, 1998; Dey *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 2007; Buchin *et al.*, 2016; Kronenfeld *et al.*, 2019; Lyu *et al.*, 2022]. Для обработки гетерогенных объектов появился подход, основанный на пространственной дифференциации алгоритмов и их параметров [Тоуа, Duchêne, Ruas, 2010; Park, Yu, 2011; Buttenfield, Stanislawski, Brewer, 2013]. Несмотря на активное развитие адаптивных методов, они покрывают весьма малочисленное множество пространственных конфигураций, исключая такие важные случаи как совместная генерализация объектов разной локализации, адаптация к структуре поверхности, сохранение связности и прочие.

Потребность в создании картографических продуктов разного масштаба на основе цифровых данных привела к развитию концепции множественных представлений объектов [Jones, Abraham, 1986; Buttenfield, 1993; Kilpeläinen, 2000; Sarjakoski, Sarjakoski, 2007] и уровней детализации [Ruas, Bianchin, 2002; Meng, Forberg, 2007; Lemmens, 2011; Biljecki, Ledoux, Stoter, 2016], которые были призваны формализовать соотношение между традиционным понятием масштаба карты и детальностью данных, лежащих в ее основе. Появилась воз-

возможность формировать электронные карты с требуемой детальностью по запросу пользователя [Torun, Köbben, Lemmens, 2000; Cecconi, Weibel, Barrault, 2002], адаптировать содержание и оформление карты к масштабу визуализации [Harrie, Sarjakoski, Lehto, 2002; Hampe, Sester, Harrie, 2004; Li, Ho, 2004], а также проектировать электронные карты переменной детальности — мультимасштабные карты [Frye, Eicher, 2003; Frye, 2006; Brewer, Buttenfield, 2007; Brewer, Buttenfield, 2009; Roth, Brewer, Stryker, 2011]. В последние годы фокус исследователей стал смещаться в сторону тематического мультимасштабного картографирования [Roth *et al.*, 2019; Raposo, 2020; Beconyté *et al.*, 2022] и использования искусственного интеллекта для генерализации [Touya, Lokhat, Duchêne, 2019; Kronenfeld, Buttenfield, Stanislawski, 2020; Ai, 2021]. Понятие детальности, ключевое для генерализации в цифровой среде, остается весьма размытым и слабо формализованным, что существенно затрудняет его применение на практике. Эта проблема так же остро стоит и для мультимасштабного картографирования, которое остается методически слабо обеспеченным направлением в картографии.

Выявленные направления и проблемы развития генерализации пространственных данных на современном этапе позволили обосновать три ее ключевых принципа для целей картографирования: адаптивность, детальность и мультимасштабность. Рисунок 1 систематизирует различные аспекты реализации этих принципов, которые рассмотрены в Главах 2-4 диссертации.

Глава 2. Адаптивная генерализация пространственных данных

В главе рассмотрен принцип *адаптивности*, определяющий необходимость учета пространственной организации картографируемых объектов. Реализующая его группа методов генерализации обладает возможностью адаптации к форме объектов, структуре и плотности их пространственного распределения, характеру пространственных отношений между ними.

Одним из первых факторов, влияющих на сложность генерализации пространственных данных и карт, является **пространственное распределение** объектов. В частности, проблема *неравномерности* распределения весьма характерна для населенных пунктов, плотность которых выше в исторически более освоенных регионах. С целью учета этой особенности был разработан метод отбора точечных моделей населенных пунктов, который базируется на классификации территории по густоте их размещения [Самсонов, Кривошеина, 2015а]. Для множества точек населенных пунктов строится диаграмма Вороного, которая разделяет всю территорию на ячейки, обладающие таким свойством, что любая точка внутри ячейки ближе к расположенному внутри

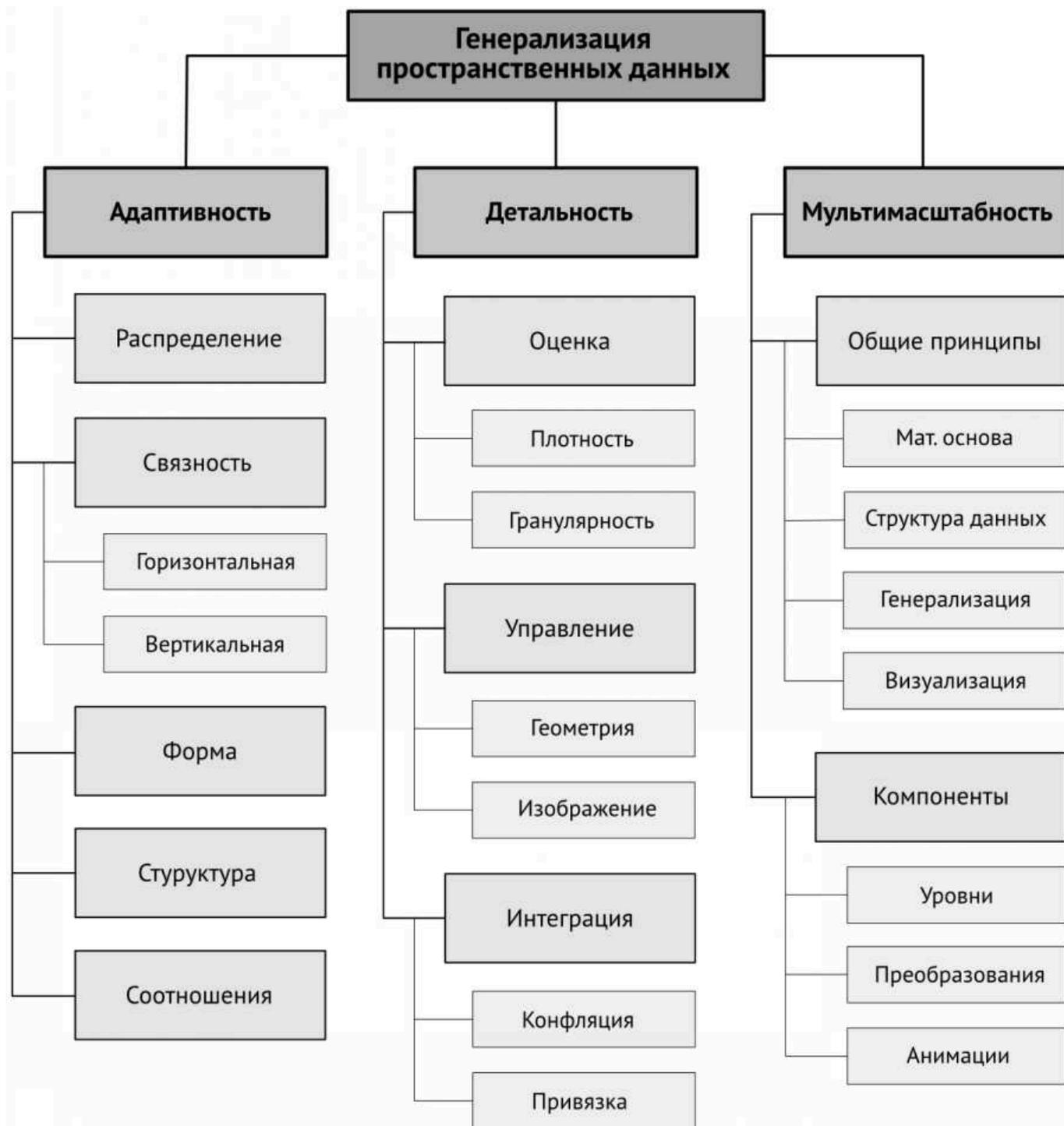


Рисунок 1. Принципы генерализации пространственных данных для целей картографирования и различные аспекты их реализации

населенному пункту, чем к любому другому населенному пункту. Итеративный отбор по ячейкам в сочетании с функцией интенсивности отбора, зависящей от площади ячейки (4 класса, выделенных методом естественных интервалов [Jenks, 1967]), позволили добиться результатов отбора для масштабного перехода $1 : 1\,000\,000 \rightarrow 1 : 8\,000\,000$ для территории России, сопоставимых с ручной генерализацией (Рисунок 2).

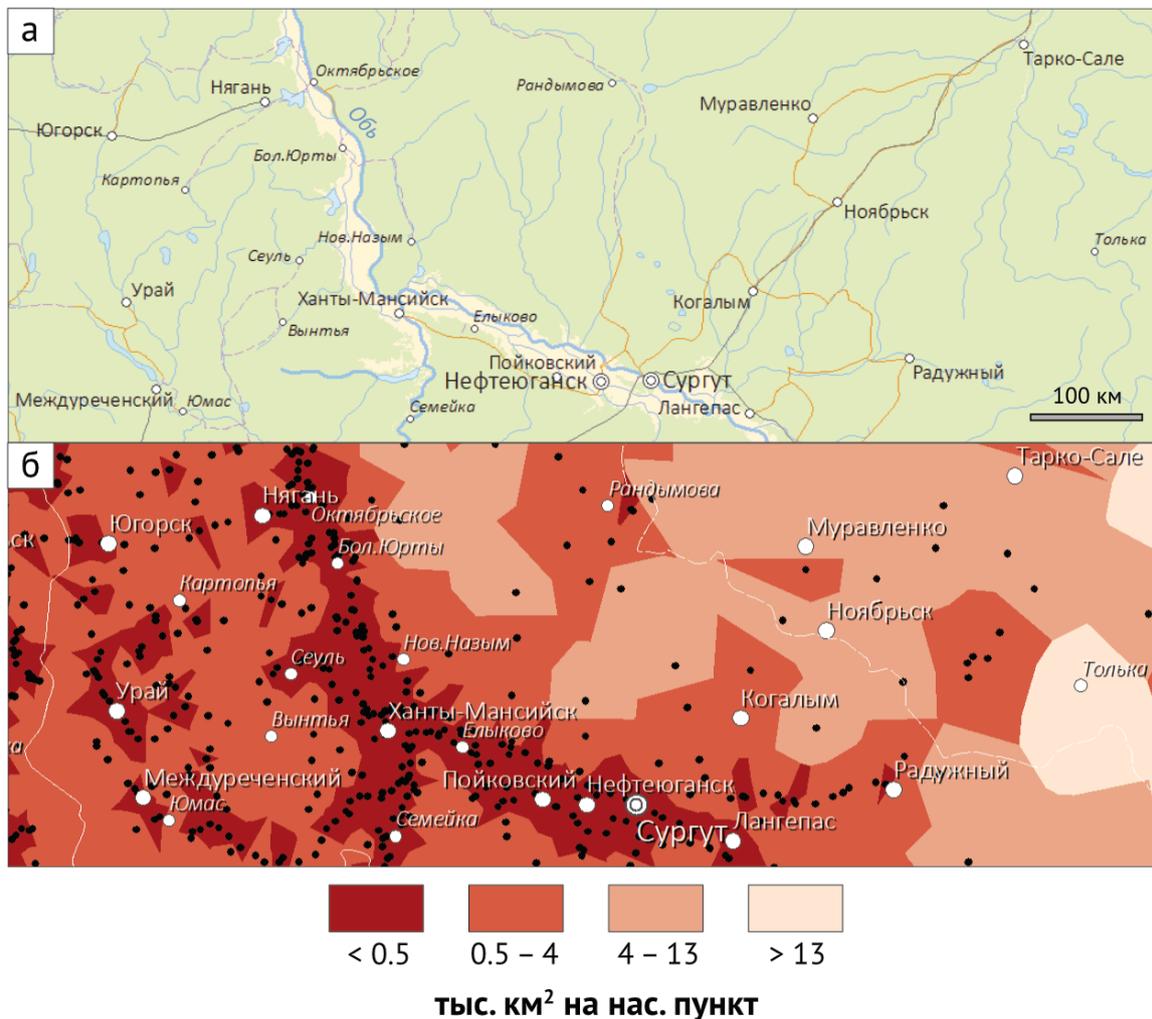


Рисунок 2. Пример отбора населенных пунктов при масштабном переходе 1 : 1 000 000 → 1 : 8 000 000: (а) результирующее изображение; (б) деление территории по густоте размещения населенных пунктов методом естественных интервалов. Черным цветом показаны исходные населенные пункты, белым — отобранные

Оценка интенсивности генерализации по обобщенному закону Топфера:

$$N_G = N_S \times \sqrt{\left(\frac{S_S}{S_G}\right)^x} \quad (1)$$

где N_S и N_G — число объектов до и после генерализации, S_S и S_G — знаменатели масштабов до и после генерализации [Li, 2006], показывает что интенсивность отбора x уменьшается с 4.2 до 1.2 для более низких классов густоты размещения населенных пунктов (редкозаселенных территорий), что соответствует принципам географической генерализации.

Следующим важным свойством объектов в географическом пространстве является их **связность**, которую можно разделить на два типа: горизонтальную и вертикальную.

Горизонтальная связность возникает между географическими объектами, находящимися в разных местоположениях. Частным случаем является транс-

портная связность населенных пунктов, отображение которой является важнейшим условием при мелкомасштабной генерализации карт. Для реализации этого требования разработан метод прореживания линейной модели автодорожной сети, который основан на построении между точками населенных пунктов кратчайших маршрутов, число которых зависит от локальной густоты дорожной сети [Самсонов, Кривошеина, 2015б]. Рисунок 3, на котором приведен пример с делением на три класса густоты методом естественных интервалов, показывает, что генерализованная дорожная сеть сбалансирована относительно населенных пунктов и содержит необходимый и достаточный набор дорог, обеспечивающих их транспортную связность.

Сравнение результатов генерализации с рукописной картой масштаба 1 : 8 000 000 [Омская фабрика, 2012] показало, что предложенная методика дает схожий с ручным отбором результат. При этом оценка интенсивности отбора (Уравнение 1) аналогично отбору населенных пунктов показала, что в наиболее интенсивность отбора x уменьшается с 1.7 до 1.5 в сравнении 1-го и

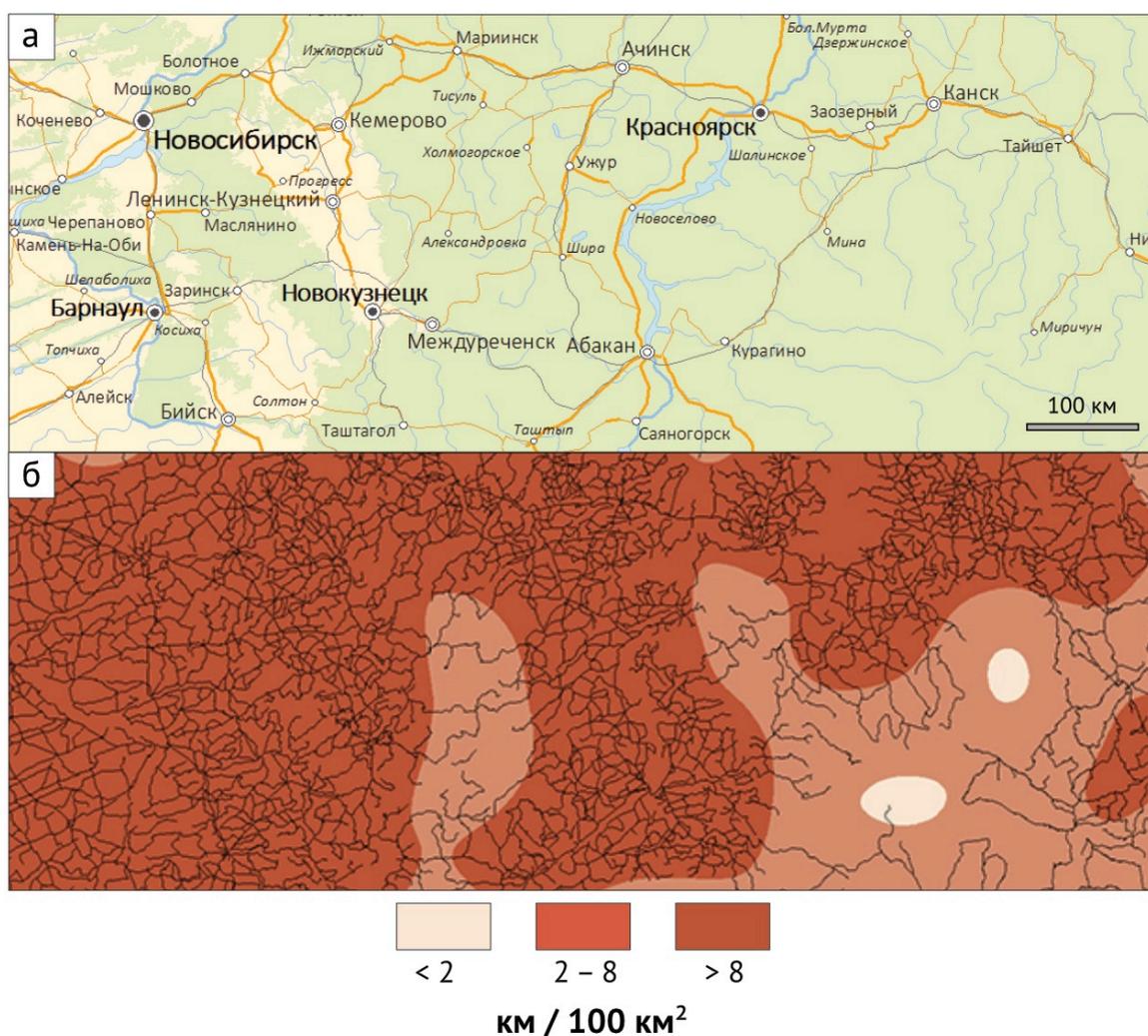


Рисунок 3. Пример прореживания автодорожной сети при масштабном переходе 1 : 1 000 000 → 1 : 8 000 000: (а) результирующее изображение; (б) деление территории по густоте автодорожной сети методом естественных интервалов

3-го класса густоты, что доказывает стремление алгоритма сохранять больше дорог в малоосвоенных регионах, где они играют важное значение.

Вертикальная связность, в отличие от горизонтальной, возникает в случае когда пространственные объекты или их части совпадают по местоположению. Так, например, административные границы пересекаются объектами гидрографии и дорогами. Для генерализации множества линейных слоев, связанных подобным отношением, была разработана методика геометрического упрощения путем стягивания ребер графа с сохранением топологии между линейными слоями [Самсонов и др., 2014]. Результаты совместного упрощения (Рисунок 4), показывают, что в случае алгоритмов Ванга-Мюллера [Wang, Müller, 1998] и Ли-Оупеншоу [Li, Openshaw, 1992] линии в ряде мест рассогласованы, в то время как при использовании предложенного подхода такая проблема отсутствует. Разработанный алгоритм показал в среднем на 10 – 11% меньшее смещение линий при одинаковом числе результирующих точек.

Форма² географических объектов является их важнейшим свойством, на основе которого во многих случаях можно судить об их происхождении. Воспроизведение характера формы в мелких масштабах — один из критериев географичности результатов генерализации. В рамках исследования впервые предложен и реализован подход к геометрическому упрощению гетерогенных линий, содержащих одновременно участки несхематичного, схематичного и ортогонального типа [Samsonov, Yakimova, 2017]. Решение получено путем сегментации линий по морфометрическим параметрам и применения к



Рисунок 4. Пример геометрического упрощения автомобильных дорог и административных границ по данным топографической карты 1 : 1 000 000: (а) разработанный алгоритм (стягивание ребер); (б) алгоритм Ли-Оупеншоу; (в) алгоритм Ванга-Мюллера

²Применительно к линиям можно также встретить термин «характер линии»

выявленным однородным участкам алгоритмов Ли-Оупеншоу, Дугласа-Пейкера [Douglas, Peucker, 1973] и специального алгоритма ортогонального упрощения. Апробация выполнена на примерах границ муниципалитетов Архангельской области, Республики Коми, а также графств штата Монтана в США. Примеры, которые представляет Рисунок 5, показывают эффективность методики в широком диапазоне уровней детализации: подчеркивается ортогональность и схематичность линий антропогенного характера, и одновременно без морфологического принуждения генерализуются границы, идущие по природным рубежам. С точки зрения пространственной точности разработанный подход обеспечил промежуточную между алгоритмами Ли-Оупеншоу и Дугласа-Пейкера величину смещения линий относительно исходных.



Рисунок 5. Геометрическое упрощение гетерогенных линий при уменьшении масштаба картографирования в: (а) 2; (б) 4; (в) 8 и (г) 16 раз (муниципалитеты Архангельской области и Республики Коми)

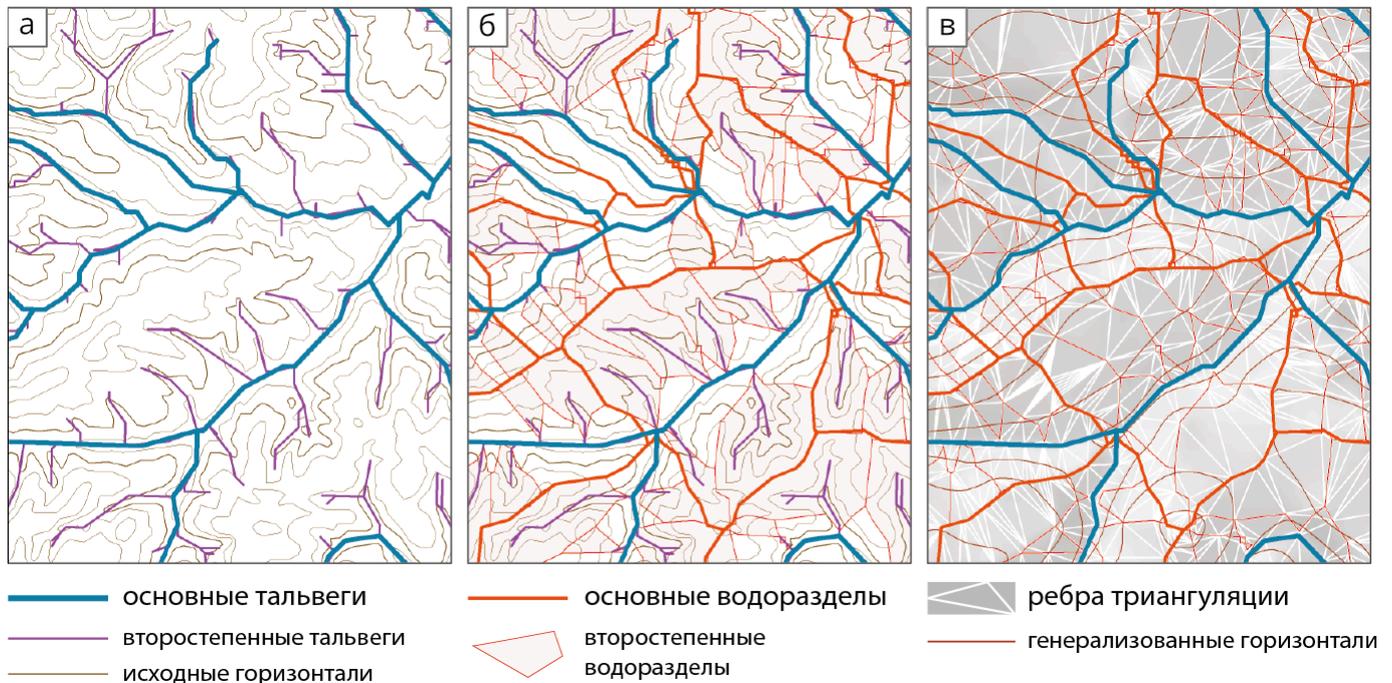


Рисунок 6. Генерализация ЦМР по структурным линиям: (а) выделение тальвегов; (б) выделение водоразделов; (в) триангуляция тальвегов и водоразделов

Пространственная структура относится к числу важнейших характеристик географических явлений сплошного распространения. К таким явлениям относится рельеф земной поверхности, обладающий каркасом структурных линий [Симонов, 1998]. Был разработан адаптивный метод генерализации цифровых моделей рельефа, сохраняющий основные структурные линии и формы [Лурье, Самсонов, 2010; Samsonov, 2011]. Генерализованная поверхность восстанавливается путем триангуляции водоразделов и тальвегов (Рисунок 6). Результирующая поверхность подвергается расширению долин и междуречий, чтобы подчеркнуть основные формы рельефа [Заруцкая, 1958].

С использованием предложенного метода на основе модели *GEBCO_2020* (разрешение 15") получена глобальная мультимасштабная цифровая модель рельефа *HYPISO*, имеющая 8 уровней детализации с пространственным разрешением 15", 30", 1', 2', 4', 8', 16' и 32'. Оценка качества полученных моделей производилась путем построения профилей, а также визуально — на основе полученных карт. Пример генерализации нагорья (Рисунок 7), показывает, что разработанный метод лучше сохраняет перепады высот и характер рельефа, чем сглаживающая фильтрация.

Пространственные соотношения характеризуют пропорции, в которых объекты разных типов присутствуют на местности. Генерализация пространственных данных методом агрегирования позволяет вычислять подобные соотношения для моделей городской погоды и климата [Garuma, 2018; Lipson *et al.*, 2022], при этом выбор оптимального метода расчетов на модельную сетку остается дискуссионным. С целью решения этой проблемы

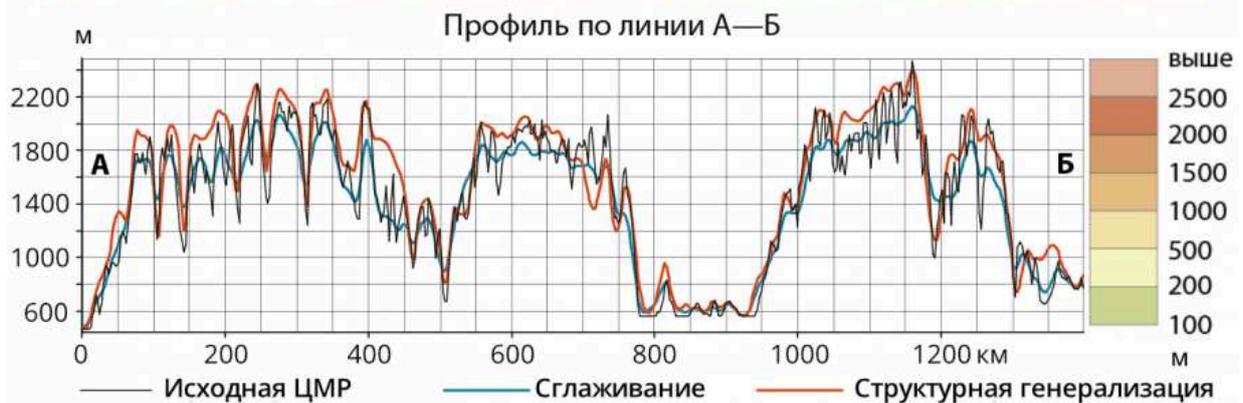
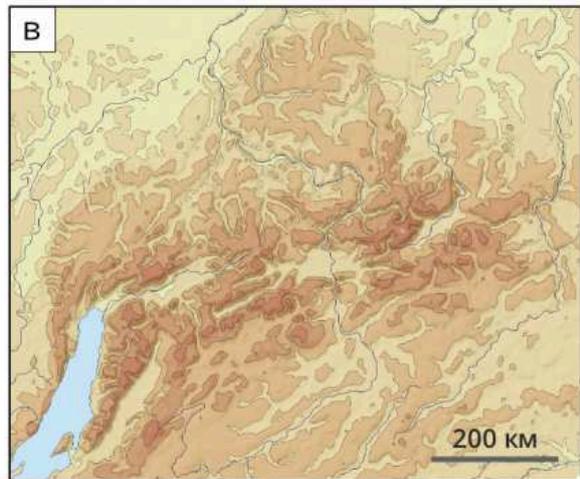
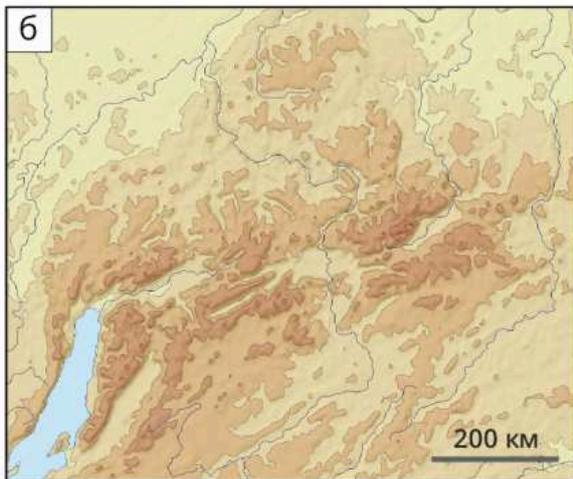
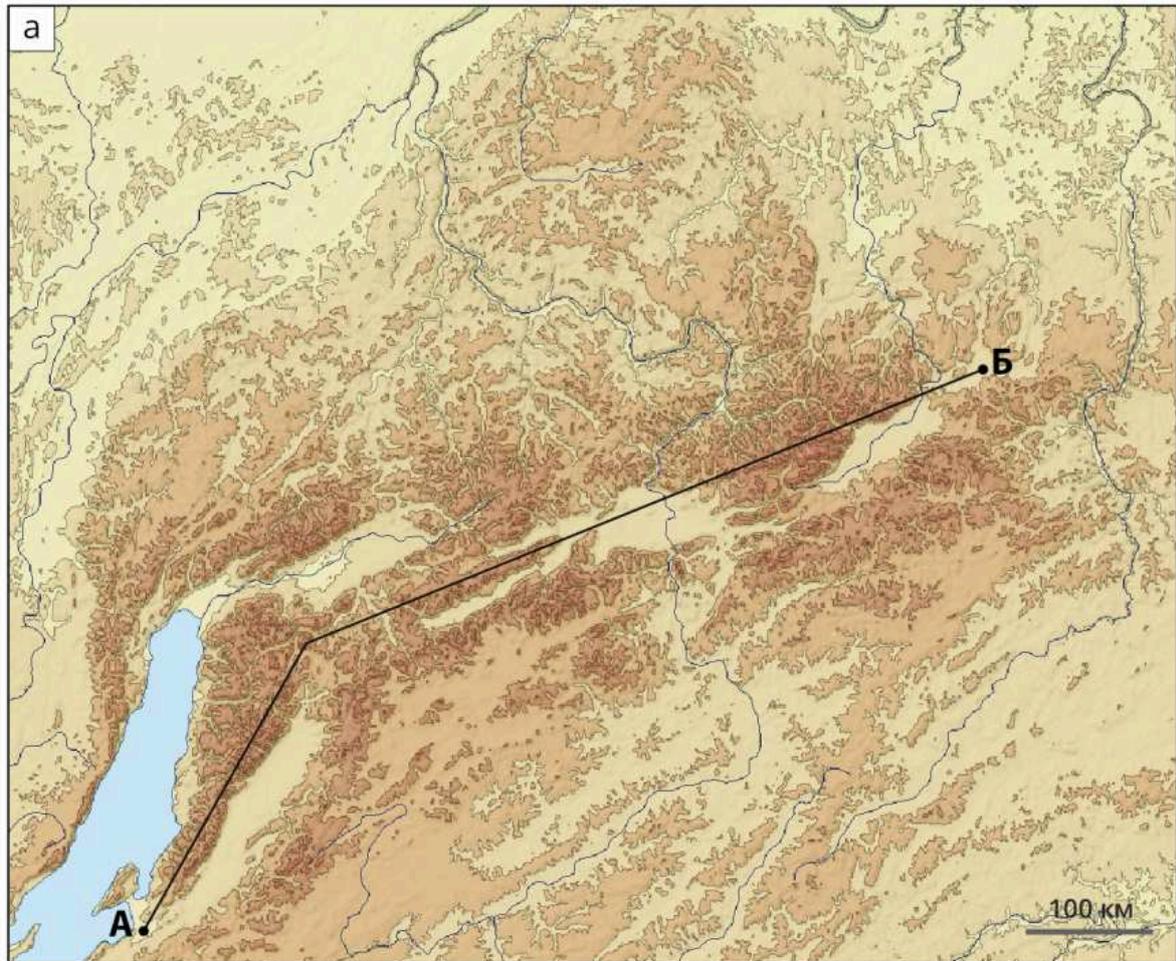


Рисунок 7. Пример генерализации ЦМР для масштаба 1 : 10 000 000 (Становое нагорье): (а) исходная ЦМР; (б) сглаживающая фильтрация; (в) структурная генерализация

разработана методика агрегирования разнородных пространственных данных для подготовки сеточных баз пространственных данных характеристик подстилающей поверхности и геометрии городской застройки [Samsonov, Konstantinov, Varentsov, 2015; Samsonov, Varentsov, 2020]. Данные о типах наземного покрова, извлеченные из космических снимков, уточняются картографическими данными о зданиях и дорогах, в процессе чего устраняются взаимные перекрытия между классами объектов, что позволяет получить корректные величины пространственных соотношений (Рисунок 8).

В работе [Varentsov *et al.*, 2020] использование полученной БД позволило сократить среднеквадратическую ошибку прогноза температуры на 12 – 18% в среднем и более чем на 30% для урбанизированных типов подстилающей поверхности по сравнению со стандартными параметризациями. А исследование [Kosheleva *et al.*, 2023] впервые выявило, что накопление дорожной пыли имеет статистически значимую связь с характеристиками городских каньонов разных пространственных масштабов, достигая максимума в коротких каньонах ($L < 500$ м). Полученные результаты нашли также свое внедрение в оперативной системе численного прогноза погоды Гидрометцентра [Rivin *et al.*, 2019; Rivin *et al.*, 2020]

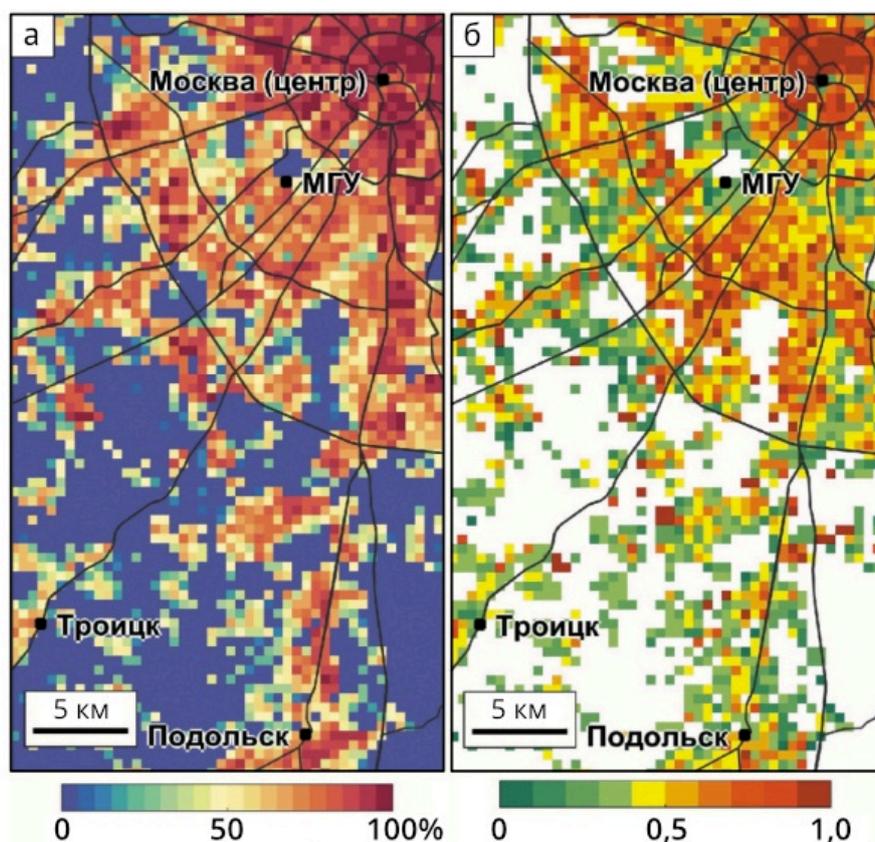


Рисунок 8. Примеры параметров городской среды, определенные на сетке с шагом 500 м для сегмента области исследования (юго-запад Москвы): (а) доля урбанизированной территории и (б) среднее отношение высоты к ширине городского каньона

Глава 3. Детальность пространственных данных

В главе раскрыт принцип *детальности*, который определяет необходимость оценки подробности цифровых моделей географических объектов не масштабом, а количественными характеристиками их геометрии и атрибутов. Исследованы такие аспекты детальности как оценка, управляемое изменение, а также интеграция данных и карт разной детальности.

Оценка детальности пространственных данных исследована для таких ключевых ее параметров как плотность и гранулярность.

Плотность, или количество информации на единицу площади, является одной из общепринятых характеристик детальности [Ruas, Bianchin, 2002; Lemmens, 2011]. В рамках настоящего исследования впервые изучена зависимость плотности цифровых топографических данных от характеристик местности [Samsonov *et al.*, 2023]. В основе методики лежит вычисление относительной плотности — отношения плотности данных выбранного участка к средней плотности для всего уровня детализации. Регрессионная модель между относительной плотностью точек, линий, пересечений в базе пространственных данных и предикторами (характеристиками местности, полученными по альтернативным источникам) призвана объяснить пространственную дифференциацию плотности топографических данных и перейти к оценке уровня детализации данных (Рисунок 9).

Исследование осуществлялось на примере цифровой топографической карты России, представленной в виде базы пространственных данных с тремя уровнями детализации, соответствующими масштабам 1 : 200 000, 1 : 500 000 и 1 : 1 000 000. Всего было выбрано 33 фрагмента (24 обучающих и 9 тестовых) размером 100 × 100 км в разных географических условиях. В качестве предикторов использованы доли различных типов наземного покрова, вычисленные на основе данных Copernicus Global Land Cover (CGLC) [Buchhorn *et al.*, 2020], индексы сложности ландшафта *Joint Entropy*, *Contagion* и *Perimeter-Area Fractal Dimension*, вычисленные на основе CGLC, расчлененность рельефа *TRI* по данным GMTED2010, а также густота дренажной и автодорожной сети по данным MERIT Hydro-Vector [Lin *et al.*, 2021] и GRIP [Meijer *et al.*, 2018] соответственно.

Уровни детализации цифровых топографических карт характеризуются систематическим ростом среднего значения плотности данных при увеличении детальности, однако распределения значительно перекрываются (Рисунок 10, а). Для проверки гипотезы о том, что разброс величины детальности имеет географические причины, была произведена нормировка абсолютного значения на его относительную величину (Рисунок 10, б), предсказанную моделью, и далее произведены *Z*-тесты для определения принадлежности фрагментов наиболее близким по плотности уровням детализации.

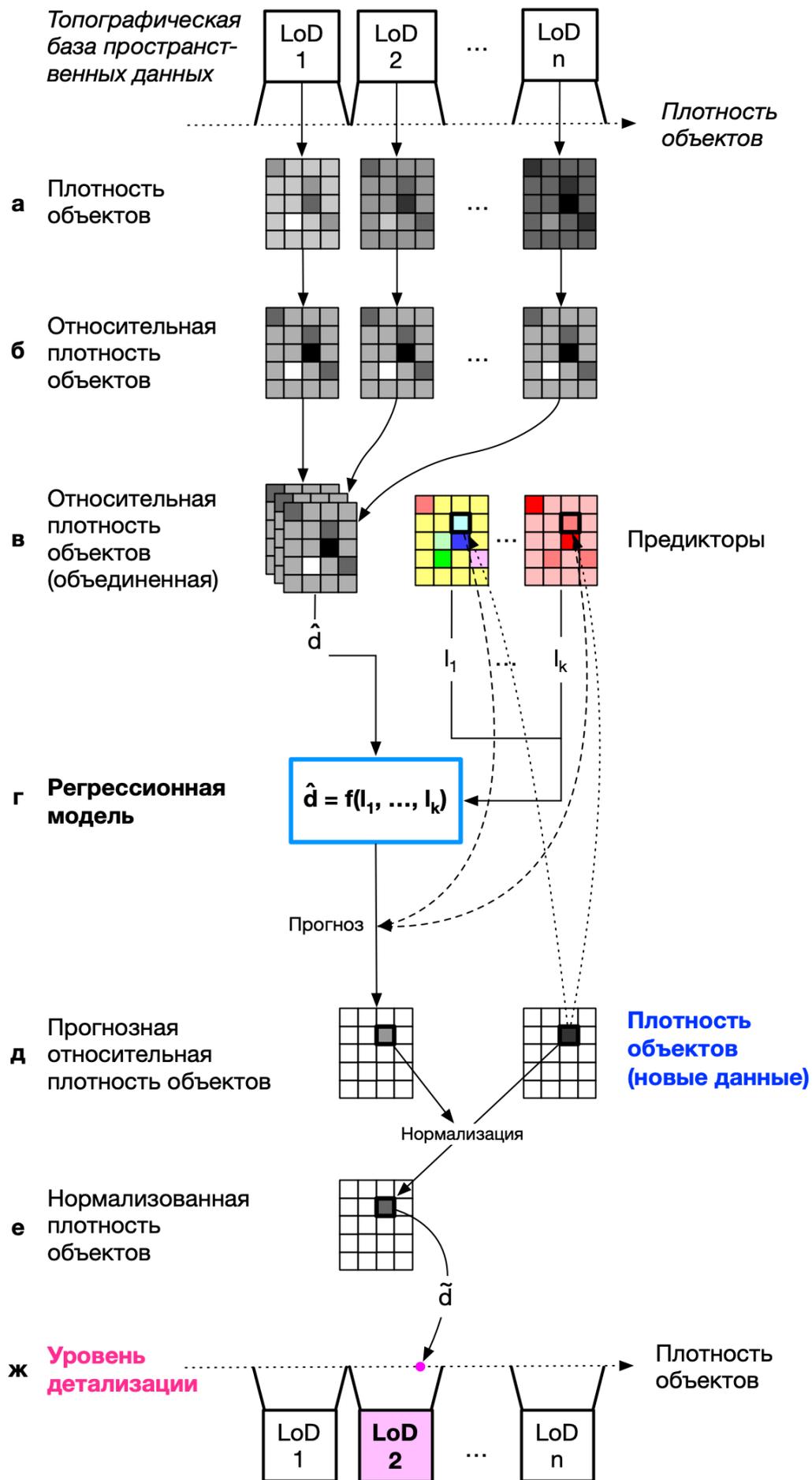


Рисунок 9. Методика определения уровня детализации данных топографических карт

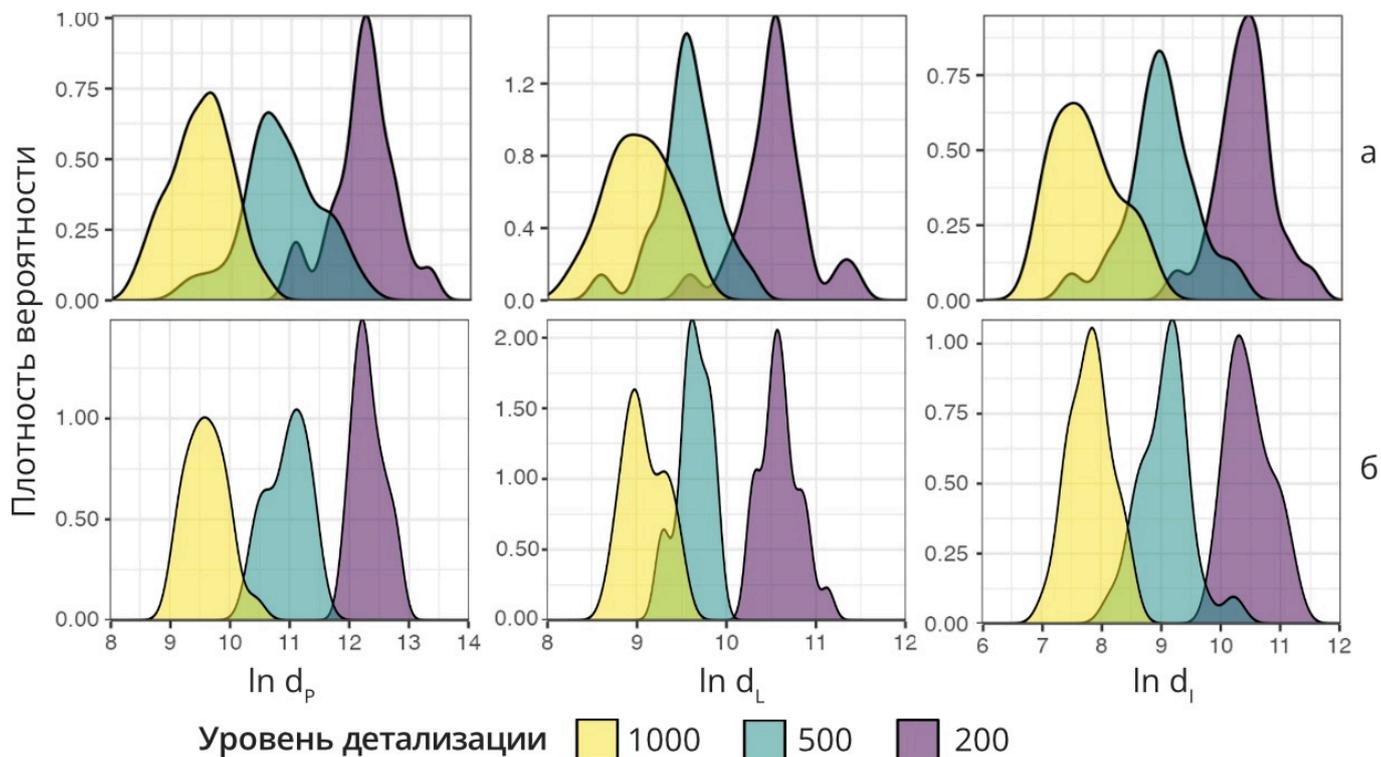


Рисунок 10. Распределение плотности точек (d_P), линий (d_L) и пересечений (d_I) для абсолютной (а) и нормированной (б) величины

Если в случае абсолютной величины плотности ошибка определения уровня детализации составила 17.1% и 12.3% для обучающей и тестовой выборки соответственно, то для нормированной величины ошибки составили уже 4.6% и 2.5% соответственно. Таким образом статистически было показано, что географические особенности территории, такие как соотношение типов землепользования, сложность ландшафта, густота дорожной сети и т.д. определяют различия в плотности данных между топографическими картами, покрывающими разные территории.

Гранулярность относится к одной из важнейших характеристик детальности данных и характеризует типичный размер объектов или их элементов [Ruas, Bianchin, 2002]. В рамках настоящего исследования понятие гранулярности ЦМР впервые формализовано и использовано при генерализации ЦМР [Samsonov, 2022]. Для оценки горизонтальных размеров форм рельефа использован оригинальный метод вычисления локальной ширины области, ограниченной заданным множеством пространственных объектов [Samsonov *et al.*, 2019]. Ширина области в точке равна диаметру наибольшего круга, который лежит внутри области и содержит данную точку (Рисунок 11).

Для оценки гранулярности ЦМР на первом этапе методом [Band, 1986] производится поиск ячеек, относящихся к тальвегам (Рисунок 12,а), которые обозначают границы положительных форм рельефа. Далее между этими ячейками строится растр ширины W (Рисунок 12,б), который дает иско-

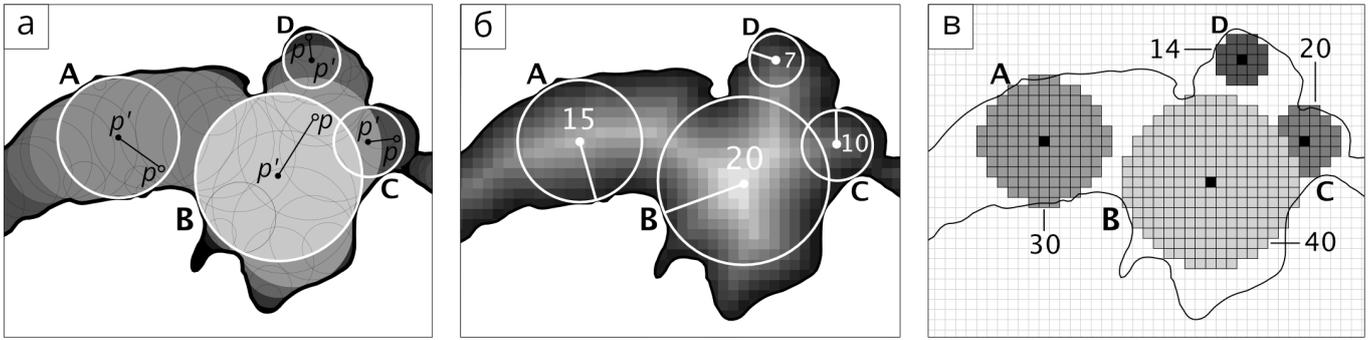


Рисунок 11. К вычислению ширины области: (а) тестовые точки p , доминантные центры p' , и соответствующие им круги (A—D); (б) растр Евклидовых расстояний от границы области и оценка радиуса круга; (в) распространение диаметра

мую оценку горизонтальных размеров положительных форм рельефа. Высота форм H оценивается как превышение над базисной поверхностью, определяемой тальвегами (Рисунок 12,в), величина которой распространена в пределах доминантных окружностей (Рисунок 12,г). Результирующая гранулярность вычисляется как средневзвешенное значение W с H в качестве веса.

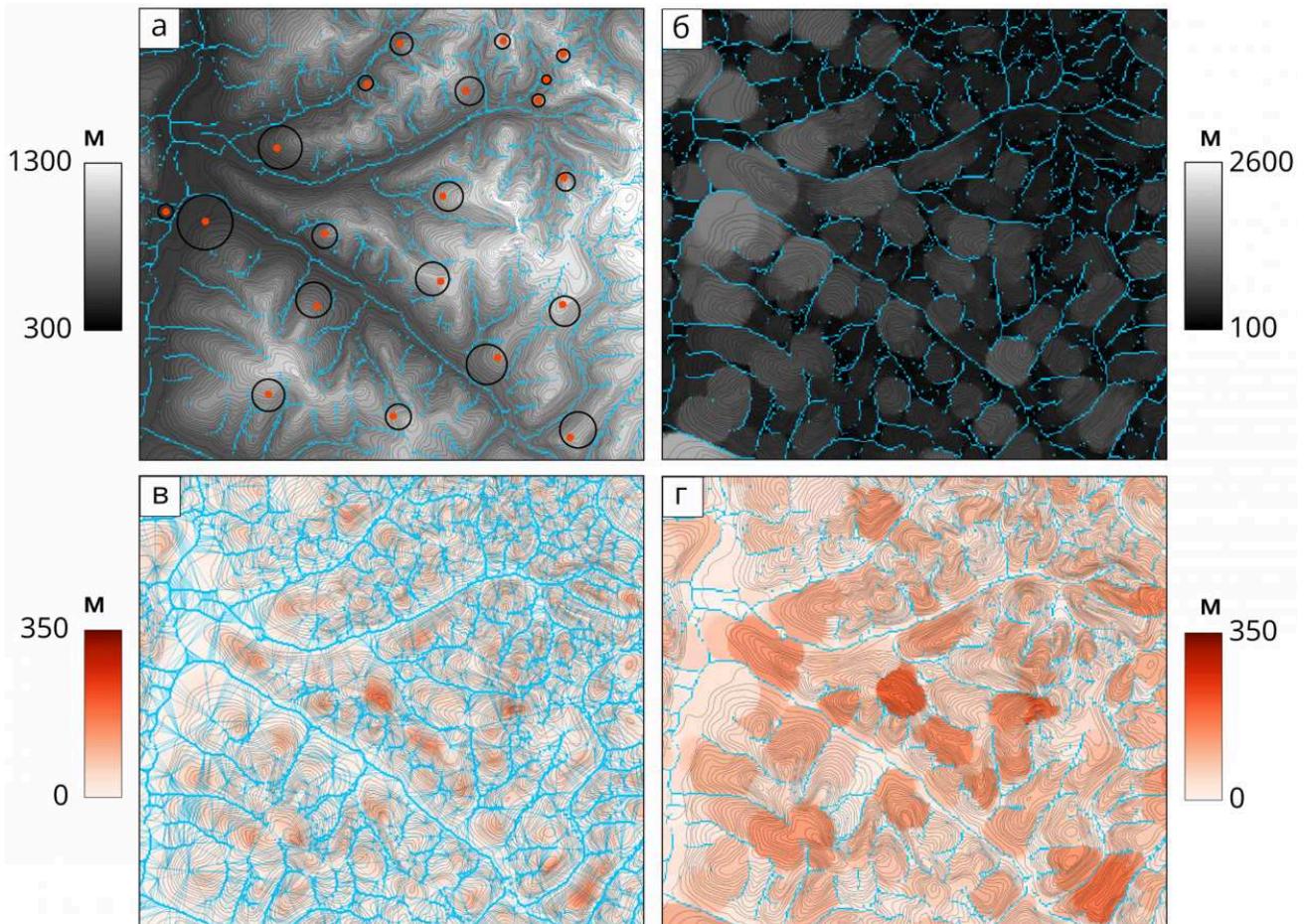


Рисунок 12. К вычислению гранулярности ЦМР: (а) дренажные ячейки (голубой цвет) и доминантные окружности для случайных точек; (б) ширина, (в) относительная высота и (г) высота формы рельефа

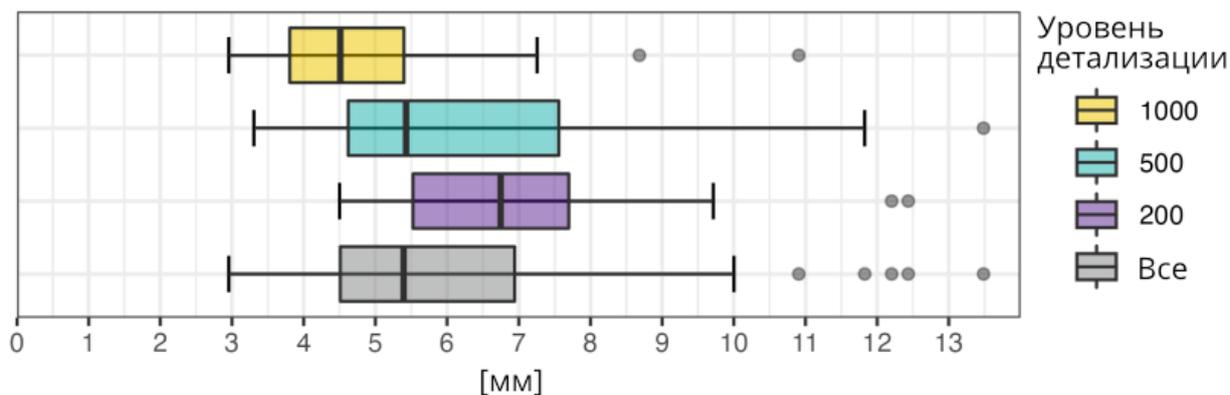


Рисунок 13. Относительная гранулярность ЦМР по данным цифровых топографических карт разной детальности

Для апробации методики выполнена оценка гранулярности ЦМР, восстановленных по горизонталям топографических карт масштабов 1 : 200 000, 1 : 500 000 и 1 : 1 000 000 для 36 участков с различными типами рельефа (всего 108 фрагментов) в пределах территории России. Экспериментально установлено, что оптимальное (средневзвешенное) значение *относительной* (в масштабе карты) гранулярности составляет порядка 5 – 6 мм в масштабе картографирования (Рисунок 13). При этом впервые показано, что отбор форм рельефа подчиняется закону Топфера, согласно которому количество объектов изменяется пропорционально квадратному корню из отношения масштабов [Töpfer, Pillewizer, 1966], т.е. их размер уменьшается, а плотность увеличивается при уменьшении масштаба.

Управление детальностью исследовано на геометрическом уровне (при обобщении пространственных данных) и на уровне изображения (при визуализации пространственных данных).

Геометрический уровень управления детальностью рассмотрен в работе на примерах генерализации цифровых моделей рельефа и геометрического упрощения линий. Проведенные эксперименты продемонстрировали, что сочетание гранулярности и пространственного разрешения в качестве ограничивающих критериев при генерализации ЦМР является достаточным для того, чтобы обеспечить необходимую детальность и графическую точность изображения, сопоставимую с результатом ручного составления рельефа на картах [Samsonov, 2022]. Рисунок 14 показывает соответствующий пример генерализации ЦМР для окрестностей города Бодайбо (Иркутская область).

Интегральная оценка различий в распределениях высот при понижении детальности ЦМР с помощью статистики Колмогорова-Смирнова D также показала, что совместное использование гранулярности и разрешения как ограничивающих метрик генерализации ЦМР позволяет обеспечить наиболее точное сохранение эмпирической функции распределения высот ($D < 0.02$

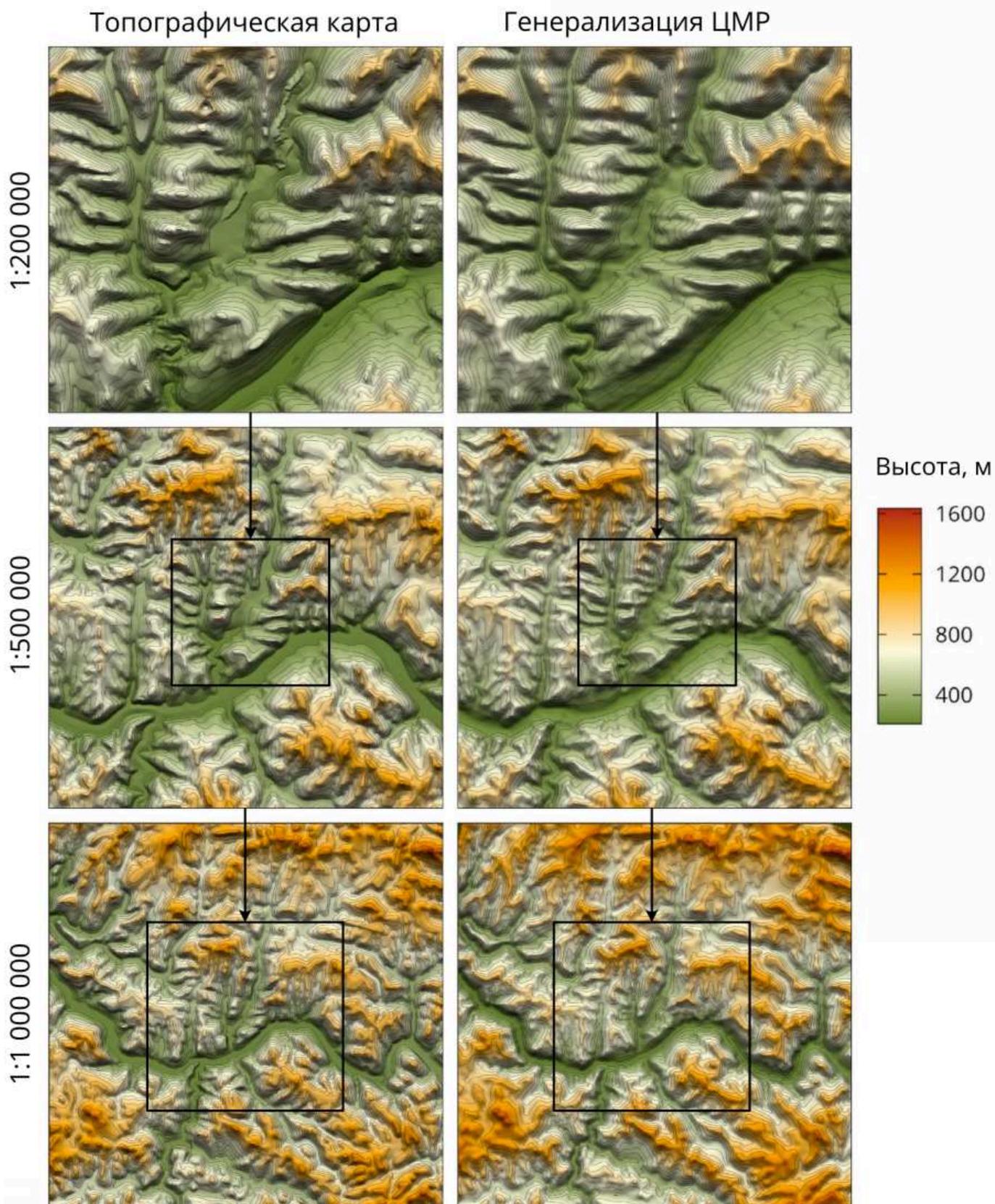


Рисунок 14. Сравнение ЦМР, построенных по данным топографических карт (слева) и полученных путем структурной генерализации ЦМР NASADEM до аналогичной гранулярности и разрешения (справа). Черными прямоугольниками обозначены охваты следующих уровней детализации. Окрестности г. Бодайбо (Иркутская обл.)

для фрагмента Бодайбо). Наихудшее соответствие имеет ЦМР, передискретизированная к целевому разрешению без учета гранулярности ($0.34 < D < 0.71$).

Ранее в настоящей работе было показано, что для линий разной формы следует использовать разные алгоритмы геометрического упрощения. Однако в этом случае возникает проблема сопоставимого уменьшения детальности, которая была исследована на примере линий, представляющих собой фрагменты побережья Исландии, Норвегии и Финляндии [Samsonov, Yakimova, 2020]. В основе разработанной методики лежит построение регрессионной зависимости вида $t = \alpha d^\beta$ между параметрами двух выбранных алгоритмов относительно заданной метрики. В качестве таких метрик предложено использовать изменение количества узлов линии, длины линии, количества изгибов линии, а также модифицированное расстояние Хаусдорфа [Dubuisson, Jain, 1994] между результирующей и исходной линией. Рисунок 15 показывает, как меняются некоторые оцениваемые метрики для трех экспериментальных линий.

Начальные вычисления производились при увеличении параметра базового алгоритма Дугласа-Пейкера d от 0 до 30 км и соответствующем росте параметров алгоритмов Ли-Оупеншоу и Висвалингам-Уайатта при $\alpha = 2, \beta = 1$ и $\alpha = 1, \beta = 2$ в качестве начального приближения. Далее параметры α и β оптимизируются таким образом, чтобы максимально приблизить кривые зависимости друг к другу. Например, для уменьшения количества изгибов алго-

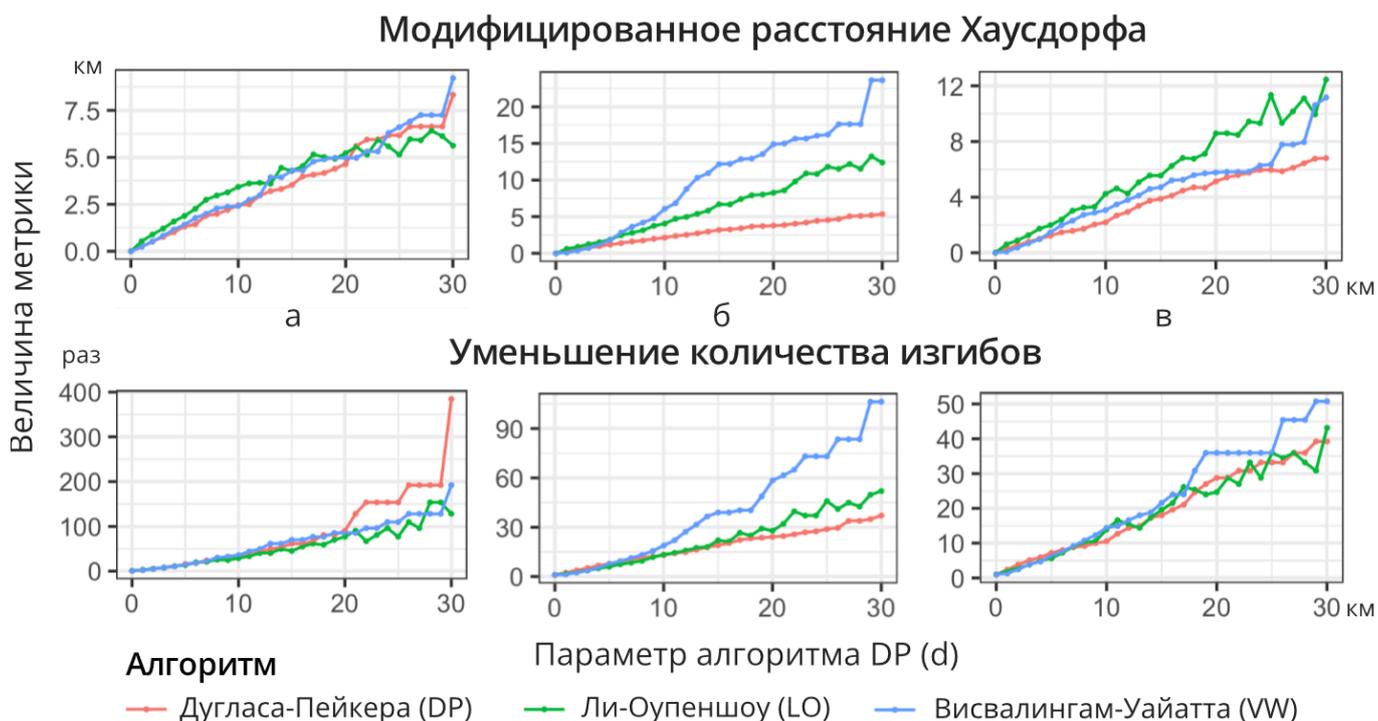


Рисунок 15. Зависимость некоторых метрик изменения геометрических характеристик от величины параметра алгоритма геометрического упрощения для фрагментов береговых линий: (а) Финляндии; (б) Норвегии и (в) Исландии

ритм Висвалингам-Уайатта для Норвегии имеет $\alpha = 3.408$, $\beta = 1.229$. Результаты показали, что в зависимости от морфологии линии наиболее эффективными оказываются разные метрики. Так, для побережья Ботнического залива наиболее показательным уменьшение модифицированного расстояния Хаусдорфа, для Норвегии — уменьшение количества изгибов, а для Исландии — взвешенное среднее между моделями по этим параметрам с весами 0.7 и 0.3 соответственно (Рисунок 16).

Управление детальностью на уровне изображения заключается в изменении параметров визуализации пространственных данных, которое приводит к изменению детальности картографического изображения. При использовании горизонталей одним из методов повышения детальности изображения является построение *дополнительных горизонталей*, которые проводятся на половине высоты сечения в местах, где заложение велико и оказываются скрыты малые формы рельефа [Imhof, 1982].

В рамках настоящего исследования был впервые разработан метод автоматизированного извлечения дополнительных горизонталей, в основе которого лежит построение двух растров: заложений и центральности [Samsonov *et al.*, 2019]. Дополнительные горизонталю сохраняются только там, где выполняется требуемое соотношение параметров заложения (ширины региона) и центральности: чем шире регион, тем ближе к его центру может располагаться дополнительная горизонталь. После этого производится фильтрация полученных линий с целью заполнить короткие разрывы и удалить короткие участки для обеспечения читаемости изображения. Результирующие изображения показывают эффективность предложенного подхода, его способность выявлять дополнительными горизонталями скрытые особенности рельефа, изображенного горизонталями (Рисунок 17).

Разработанный в настоящем исследовании метод позволил не только полноценно автоматизировать построение *штрихов крутизны и теневых штрихов*, но также алгоритмизировать получение картографических изображений различной детальности [Samsonov, 2014]. Цифровая модель рельефа сглаживается с помощью гауссова фильтра с заданными параметрами (размер, количество итераций). После этого выполняется построение изолиний с заданным сечением, и вдоль изолиний с равным шагом испускаются линии тока. Более высокая детальность изображения достигается при использовании более частотного сечения рельефа, малого интервала расстановки штрихов, а также размера сглаживающего фильтра и количества итераций сглаживания. Повышение прозрачности штрихов при уменьшении высоты позволяет реализовать эффект атмосферной перспективы и представить вершины более детально.

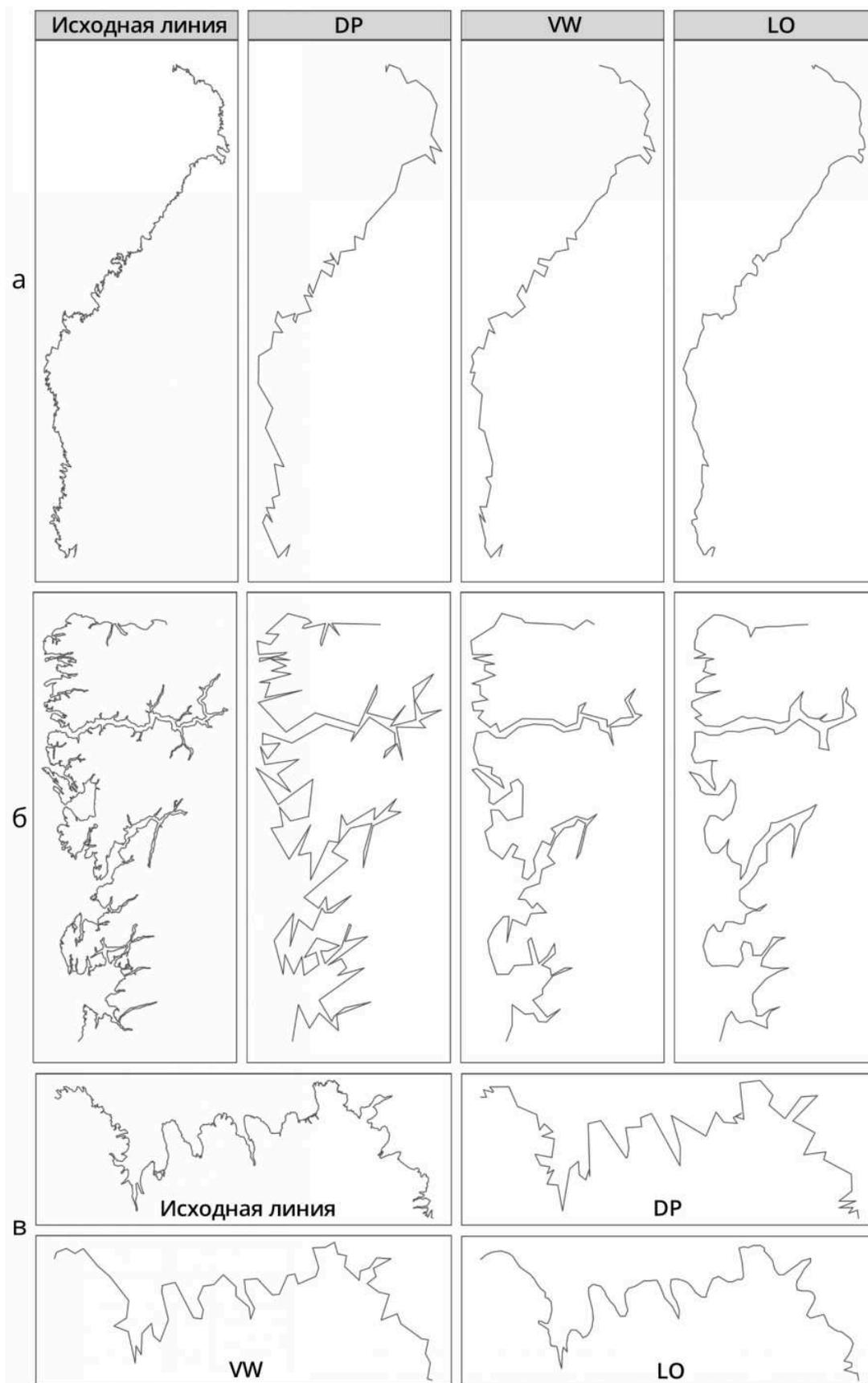


Рисунок 16. Геометрическое упрощение фрагментов береговых линий для достижения гомогенного уровня детализации при комплексировании метрик модифицированного расстояния Хаусдорфа и уменьшения количества изгибов для: (а) Финляндии; (б) Норвегии и (в) Исландии. DP — алгоритм Дугласа-Пейкера; VW — алгоритм Висвалингам-Уайатта; LO — алгоритм Ли-Оупеншоу

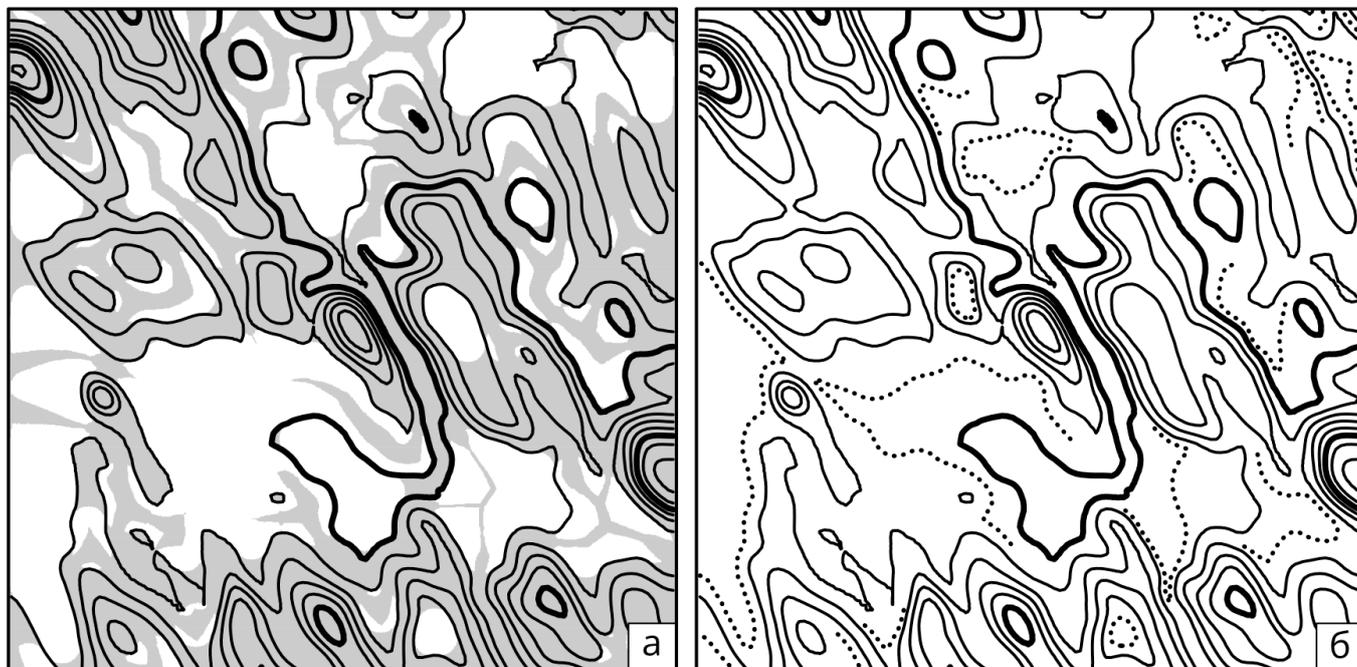


Рисунок 17. Повышение детальности изображения ледникового рельефа с помощью дополнительных горизонталей в швейцарском стиле (пунктиром): (а) зоны допустимого проведения (отмечены белым); (б) результирующее изображение (друмлины)

Интеграция разнородных пространственных данных предполагает их совмещение в пространстве для проведения дальнейшего совместного анализа и картографирования. При этом задача осложняется в случае когда данные обладают разной детальностью и обнаружение идентичных объектов становится затруднительным.

Конфляция как случай интеграции связана с высокоточным (пообъектным) совмещением данных, полученных из разных источников [Saalfeld, 1988; de Smith, Goodchild, Longley, 2018]. В настоящем исследовании впервые решена проблема автоматизированной конфляции данных о рельефе и гидрографии [Samsonov, 2020]. Рисунок 18 иллюстрирует общую схему методики, в основе которой лежит поиск контрагентов — линий на поверхности ЦМР, наиболее близких по конфигурации к водотокам. Экспериментальная апробация методики выполнена на примере конфляции ЦМР *GEBCO_2019* и гидрографических данных *Natural Earth* с детализацией, соответствующей масштабу картографирования 1 : 10 000 000. Тестирование проводилось на примере территории в Центральной Европе (среднее течение реки Дунай) размером приблизительно 600 × 400 км. Достигнуто полное визуальное совмещение водотоков и ЦМР (Рисунок 19). Количественная оценка совмещенности дренажных ячеек и линий водотоков по коэффициенту Каппа Коэна показала улучшение с $\kappa = 0.56$ до $\kappa = 0.98$, что подтверждает эффективность предложенной методики.

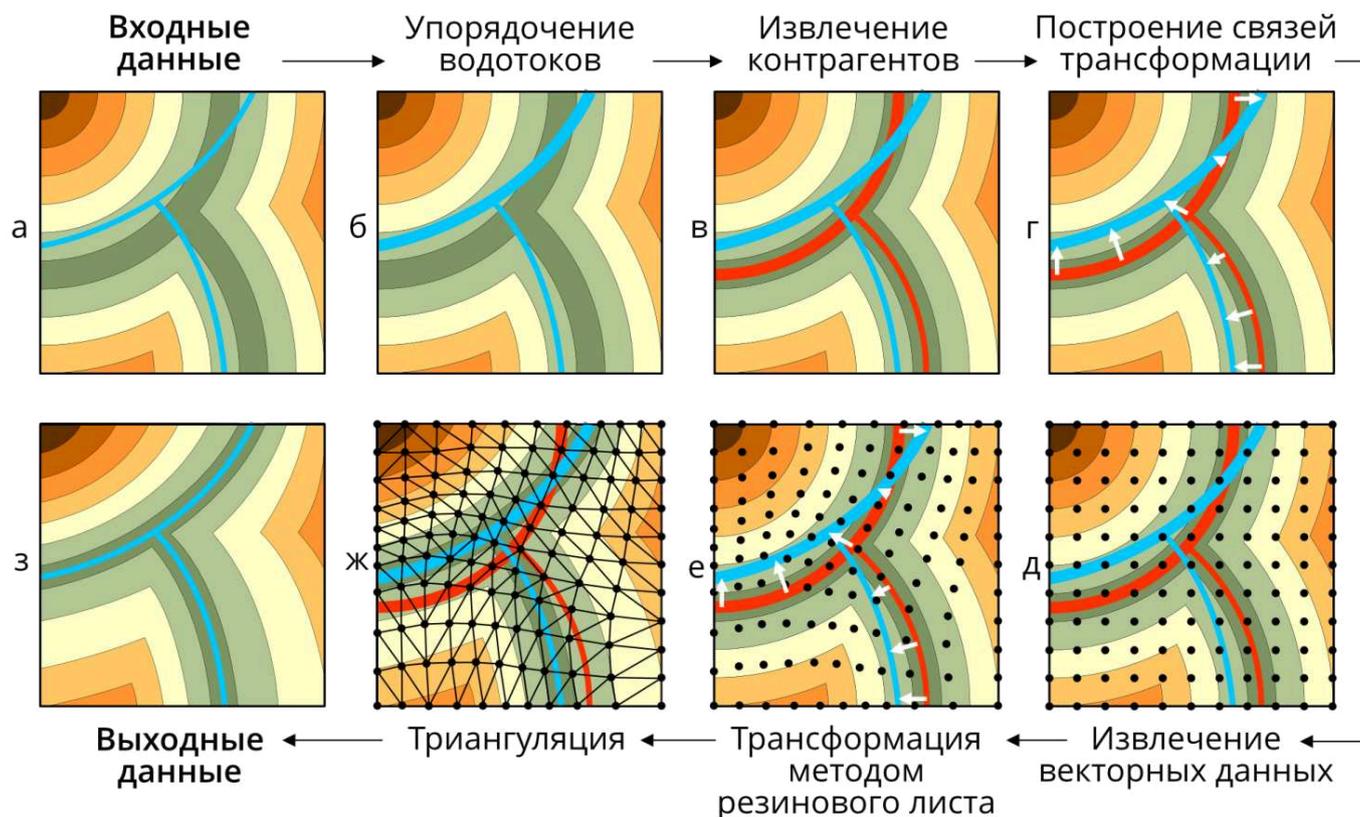


Рисунок 18. Методика конфликти цифровой модели рельефа и гидрографических данных разной детальности

Координатная привязка родственна конфликти, но носит более общий характер и связана с трансформацией полного массива данных или карт по контрольным точкам без поиска пообъектных соответствий. Большое разнообразие геоизображений (общегеографические, тематические карты, снимки и т.д.) разной детальности (масштаба) и за разные временные периоды затрудняет поиск универсального решения для их взаимной координатной привязки. В рамках диссертационного исследования была впервые получена модель координатной привязки геоизображений – карт, космических снимков и их сочетаний – с использованием технологии *LoFTR (Local Feature Matching with Transformers)*, реализующей поиск и сопоставление опорных точек с использованием компьютерного зрения и опциональной кластеризации изображений [Мухаметшин, Самсонов, Лурье, 2024]. Полученные на 10 аналогичных парах геоизображений результаты свидетельствуют о высокой точности нахождения ключевых точек для геоизображений, имеющих схожую ориентировку: средняя величина невязки составила 4.5 пикселя при среднем значении вектора смещения в 4.6 пикселя и достоверности выделения ключевых точек в 91.9%. Рисунок 20 демонстрирует пример успешно проведенного сопоставления для сложной пары геоизображений.

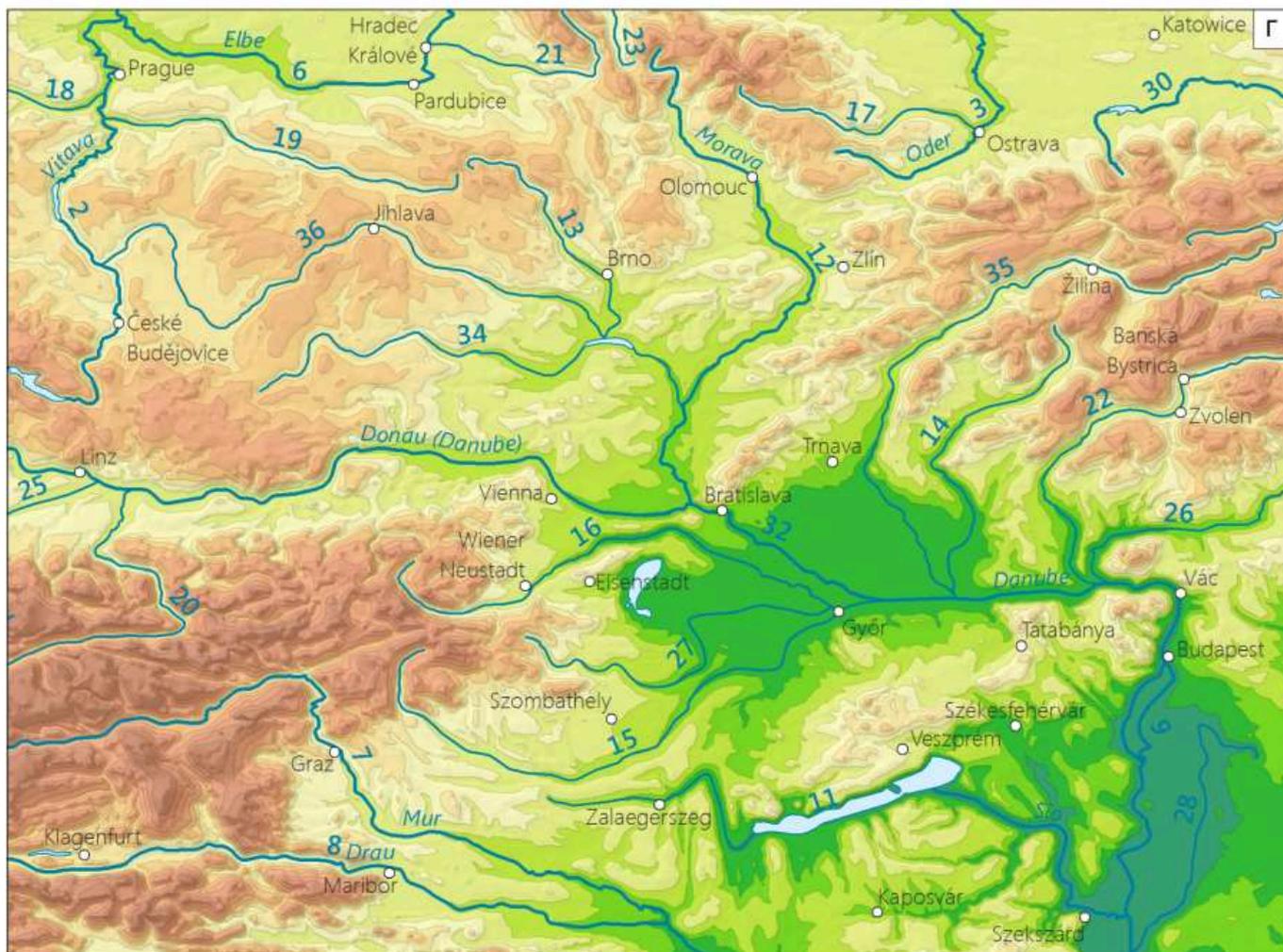
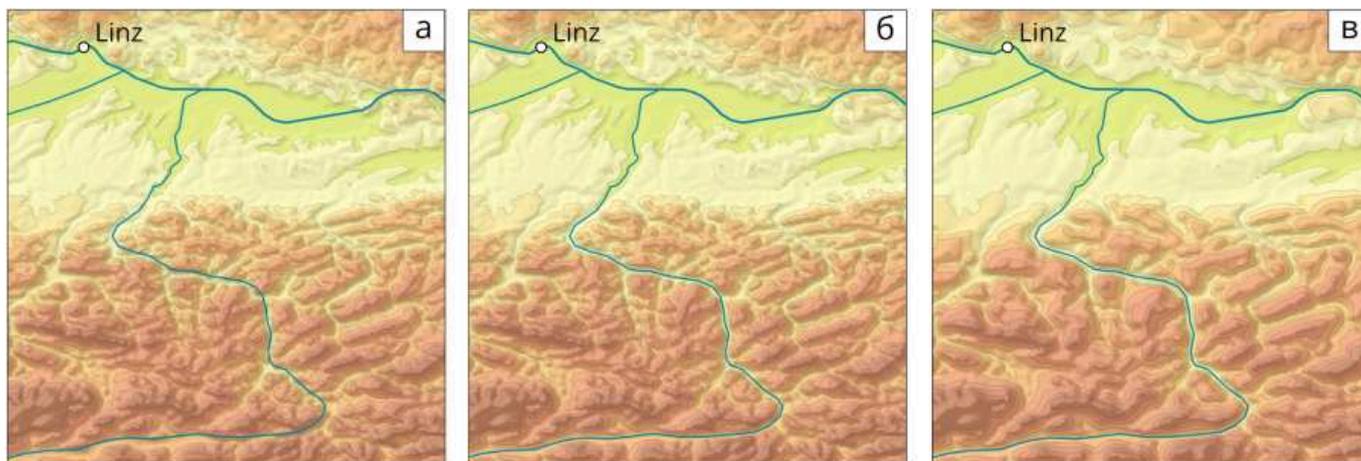


Рисунок 19. Пример результата конфликации ЦМР *GEBCO_2020* (разрешение 30") и объектов гидрографии *Natural Earth* для масштаба 1 : 10 000 000: (а-в) укрупненный фрагмент окрестностей г. Линц (а — исходные данные, б — конфлиция, в — генерализация); (г) вся территория в районе среднего течения р. Дунай. *Примечание: водоток №36 представлен с ошибкой в исходных данных, но сохранен для проверки устойчивости алгоритма*

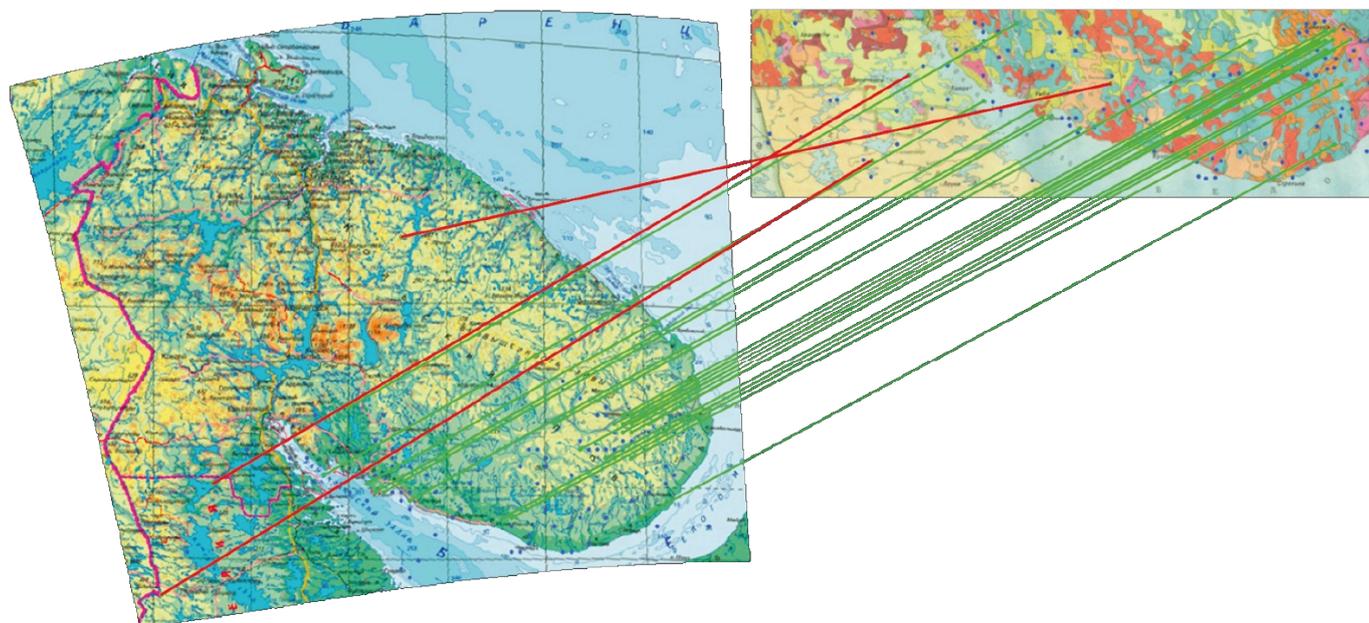


Рисунок 20. Координатная привязка фрагмента почвенной карты Мурманской области (1 : 2 000 000) к общегеографической карте Европейской части России (1 : 2 500 000). Зеленым показаны корректные векторы трансформации, красным — ошибочные

Глава 4. Мультимасштабное картографирование

В главе рассмотрен принцип *мультимасштабности*, постулирующий необходимость интерактивной генерализации пространственных данных в соответствии с масштабом их визуализации в цифровой среде. Для определения оптимального соответствия между масштабом визуализации, детальностью используемых для этого пространственных данных и способами их изображения необходимы методологические основания. Соответствующие исследования выполнены в рамках настоящего исследования, где были в том числе введены следующие базовые понятия.

Мультимасштабное картографирование (МК) — это создание и использование электронных карт переменной детализации, обеспечивающих представление объектов во множестве масштабов. Мультимасштабные карты отличаются введением таких элементов математической основы как масштабный ряд и масштабный диапазон.

Масштабный ряд — упорядоченная последовательность масштабов карты, на которых производится ее составление. Используется для контроля детализации и оформления карты, а также отображения ключевых уровней иерархии отображаемого явления.

Масштабный диапазон — числовой отрезок, границы которого определяются крайними элементами (минимальным и максимальным) масштабного ряда. В пределах масштабного диапазона осуществляется генерализация изображения. За его пределами — простое уменьшение и увеличение масштаба без изменения детализации.

Мультимасштабная база пространственных данных — база пространственных данных, содержащая множество уровней детализации. Используется для информационного обеспечения МК, позволяет выполнить ресурсоемкие операции генерализации заранее.

При формировании мультимасштабных карт методы генерализации пространственных данных могут использоваться на двух разных уровнях: на *уровне базы данных* (предварительная подготовка) и на *уровне карты* (генерализация «на лету»). На первый уровень выносятся ресурсоемкие операции, которые не могут быть выполнены в режиме реального времени и/или требуют ручной верификации результатов. Выполняется поиск и *интеграция* источников данных, наилучшим образом соответствующих уровням детализации. Неохваченные данными уровни заполняются путем генерализации заполненных.

Основные задачи МК:

1. Моделирование пространственно-временных многоуровневых структур географических явлений, объектов, процессов и отношений;
2. Синтез информации о географической среде путем применения картографической генерализации как научного метода исследования;
3. Совершенствование принципов оформления карт с учетом визуального восприятия масштабных переходов;
4. Интеграция карт и данных различной детализации в единые мультимасштабные модели и хранилища данных.

Систематическое решение этих задач требует декомпозиции механизма построения мультимасштабных карт на три **компоненты**, которые исследованы в настоящей работе на примерах карт различной тематики:

1. *Уровни (масштабные уровни, уровни детализации)*, которые определяются сочетанием пространственных данных определенной детальности и метода их визуализации в заданном масштабе.
2. *Преобразования*, которые определяют логику изменений, происходящих между масштабными уровнями при смене масштаба визуализации.
3. *Анимации*, которые визуализируют преобразования в виде плавных переходов.

В основе проектирования мультимасштабных карт лежит опыт традиционного картографирования в разных масштабах. На основе анализа многочисленных карт и научной литературы, путем сравнения карт в разных масштабах (масштабных уровней) были выделены следующие принципы преобразований картографического изображения при изменении масштаба картографирования [Самсонов, Подольский, Юрова, 2013]:

1. Логичность и последовательность изменения графических переменных.
2. Циклическое заимствование графических переменных при переходе на более высокий уровень единиц картографирования.
3. Переход от аналитических способов к комплексным и синтетическим.
4. Постепенное изменение информационной и графической нагрузки.

Так, например, принцип *последовательности* обеспечивает на мультимасштабной карте численности населения постепенное уменьшение среднего размера картодиаграмм при одновременной смене иерархического уровня единиц картографирования (Рисунок 21, экономические районы даны как пример возможной группировки административных единиц).

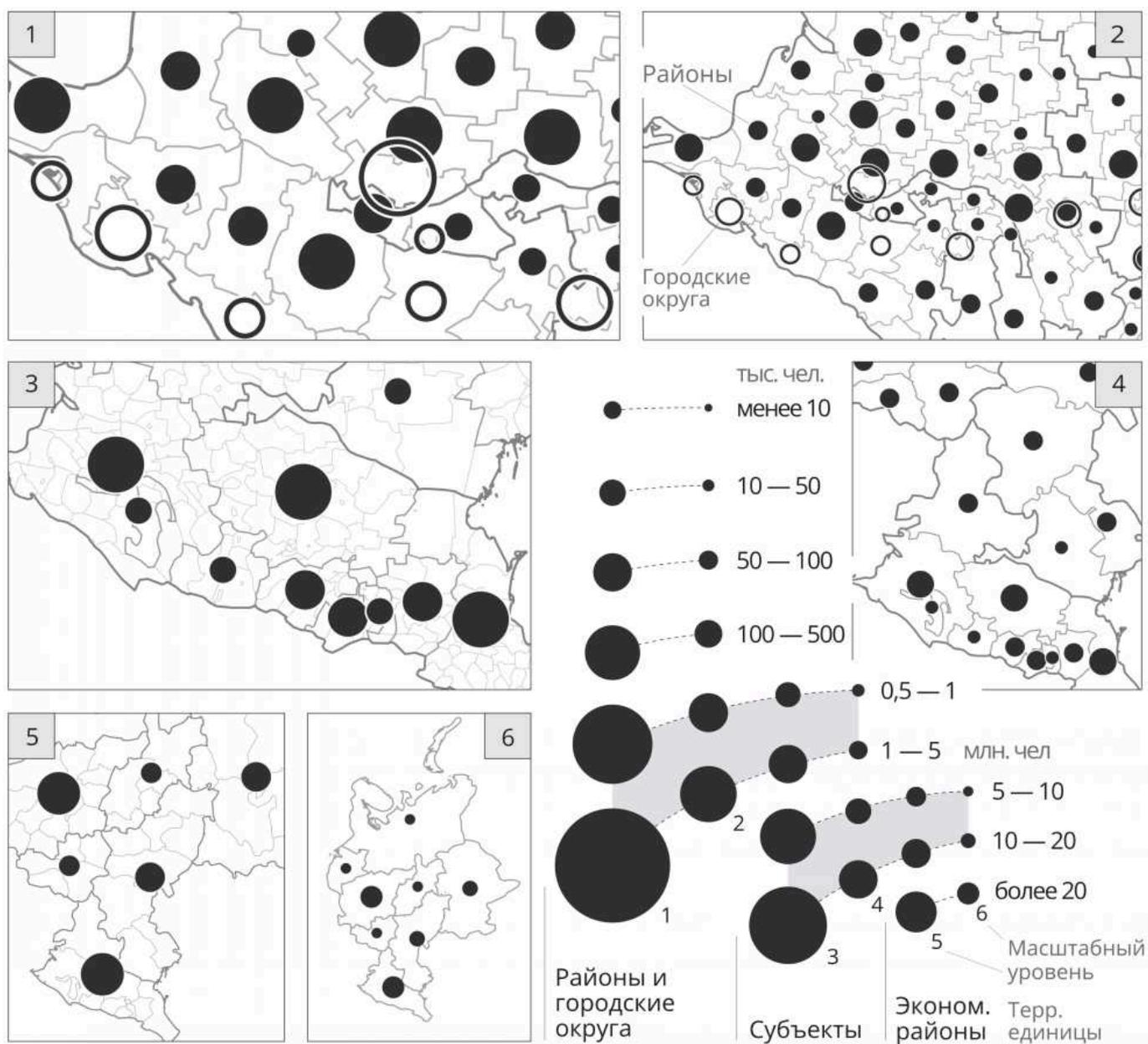


Рисунок 21. Картодиаграммы численности населения на мультимасштабной карте Европейской территории России (границы и данные на 2013 г.), масштабные уровни 1-6

Перечисленные принципы легли в основу серии исследований, в которых предлагаются методические решения по генерализации пространственных данных и их отображению для обеспечения географически обоснованной логики преобразования масштабных уровней на мультимасштабных картах различного содержания и тематики.

Важным аспектом изображения на **мультимасштабных общегеографических картах** является необходимость согласованного отображения множества слоев, образующих пространственные структуры [Touya, Gruget, Muehlenhaus, 2023]. Для исследования этой проблемы был разработан способ вычисления масштабных уровней и преобразований отображения дорожной сети и структуры населенных пунктов [Самсонов, Подольский, 2014]. Предложенная методика реализует следующие принципы:

1. Трансляция оформления из самого крупного в более мелкие масштабы с применением подходящих операторов: отбор и уменьшение толщины дорог, а также геометрическое упрощение полигонов структуры населенных пунктов и их разность с буферизованными линиями дорог.
2. Исключение классов дорог в критических масштабах, определяемых по достижению максимально допустимой графической нагрузки.
3. Генерализация полигонов структуры населенного пункта в каждом критическом масштабе в 4 этапа: геометрическое упрощение; агрегирование малых по размеру полигонов; буферизация дорог на ширину их символа; геометрическая разность полигонов структуры и буферных зон.

Апробация методики, проведенная на примере территории г. Санкт-Петербург по данным OpenStreetMap (OSM), показала, что плотность дорог меняется последовательно и не характеризуется избыточностью, а полигоны застройки на мелких уровнях детализации подвергаются объединению, которое топологически корректно по отношению к дорогам.

На картах **физико-географической тематики** часто используется способ *изолиний*, который позволяет визуализировать распределение географических полей. Примерами могут служить гипсометрические карты и карты характеристик ветрового волнения в морях. Мультимасштабные варианты таких карт предполагают генерализацию растровых и триангуляционных моделей, лежащих в основе таких карт, а также выбор оптимальной шкалы сечения для каждого масштаба картографирования. Таким образом обеспечивается логическая последовательность масштабных уровней карты.

В рамках данной части исследований была создана база пространственных данных и мультимасштабная гипсометрическая карта, охватывающая Европейскую территорию России в масштабах 1 : 25 000 — 1 : 50 000 000 (с частичным покрытием в крупных масштабах) [Samsonov, 2011]. При составле-

нии карты использован метод масштабных групп с выделением 11 масштабных уровней, соответствующих уровням детализации созданной базы данных. При визуализации использована мультимасштабная гипсометрическая шкала, обеспечивающая реализацию принципа преемственности цветового ряда (Рисунок 22). Разработанная карта позволяет осуществлять исследование рельефа в широком диапазоне масштабов.

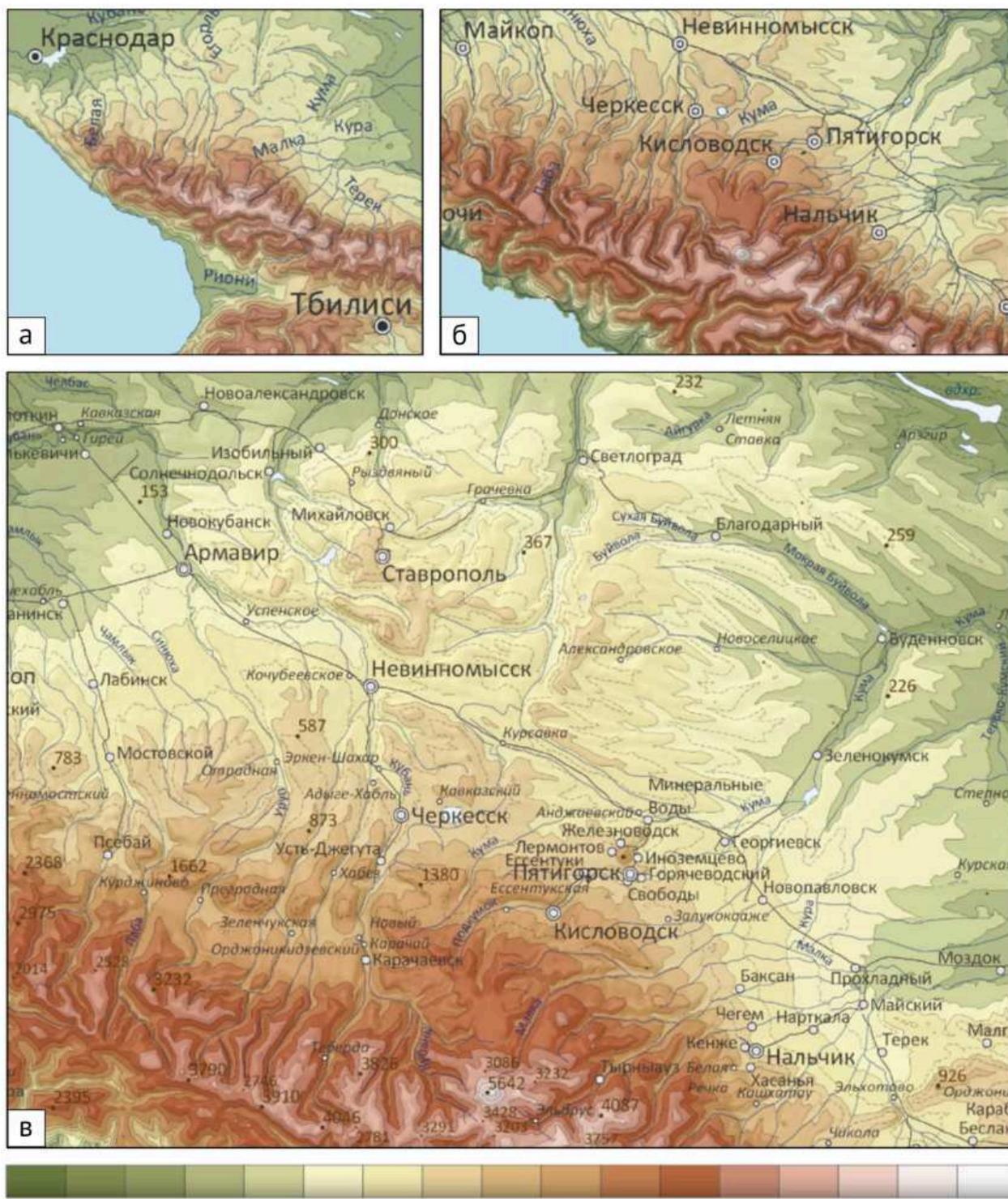


Рисунок 22. Изображение северных предгорий Большого Кавказа на масштабных уровнях: (а) 1 : 10 000 000, (б) 1 : 5 000 000 и (в) 1 : 2 500 000

В гидрометеорологических исследованиях триангуляционные модели используются с целью построения, отображения и анализа физических полей на основе результатов измерений или моделирования. В частности, при моделировании характеристик ветрового волнения, модельную сетку сгущают вблизи берегов исходя из сильной изменчивости поля на прибрежных акваториях [Cavaleri *et al.*, 2007; Myslenkov *et al.*, 2023]. Сгущение сетки приводит к тому, что детальность построенных на ее основе изолиний неравномерна по пространству, а прибрежные детали поля становятся не видны в мелких масштабах картографирования.

Исследование возможностей отображения таких пространственных данных на мультимасштабных картах было выполнено в два этапа. На первом этапе принципы, аналогичные созданной гипсометрической карте, были применены при создании Атласа ресурсов волновой и ветровой энергии морей России [Myslenkov *et al.*, 2023]. В частности, для каждой характеристики волнения было спроектировано несколько масштабных уровней, кратно отличающихся интервалом изолиний, что позволило реализовать принцип последовательного преобразования изображения (Рисунок 23,а-б). На втором этапе был впервые предложен и реализован оператор утрирования высокоизменчивых прибрежных участков, который основан на пересчете значений в узлах с учетом расстояния от берега, градиента расстояния от берега, градиента непосредственно самого поля, а также расстояний до соседних узлов триангуляции. Пример генерализации (Рисунок 23,в-г), показывает, что утрирование действительно позволяет преувеличить особенности прибрежного поля высоты волн, что может быть полезно для его отображения в мелких масштабах картографирования.

В области **социально-экономического картографирования** большое внимание уделяется каркасу системы расселения, который образован населенными пунктами и транспортными сетями, а также системе административно-территориального деления, которая является основой статистического учета. Эти системы обладают иерархическими свойствами, образуя объекты разных пространственных масштабов. В частности, *полимагистрал* представляют собой «единение параллельно идущих линий различных видов общего и специального транспорта в территориально-сближенные и однонаправленные пучки» [Воробьев, 1973; Полян, 1988].

В рамках настоящего исследования впервые разработана методика автоматизированного выделения полимагистралей, основанная на поиске сонаправленных участков автомобильных и железных дорог, расположенных в коридоре заданной ширины [Самсонов, Прохорова, 2019]. После того как такие участки найдены, они совмещаются посредством процедуры интеграции век-

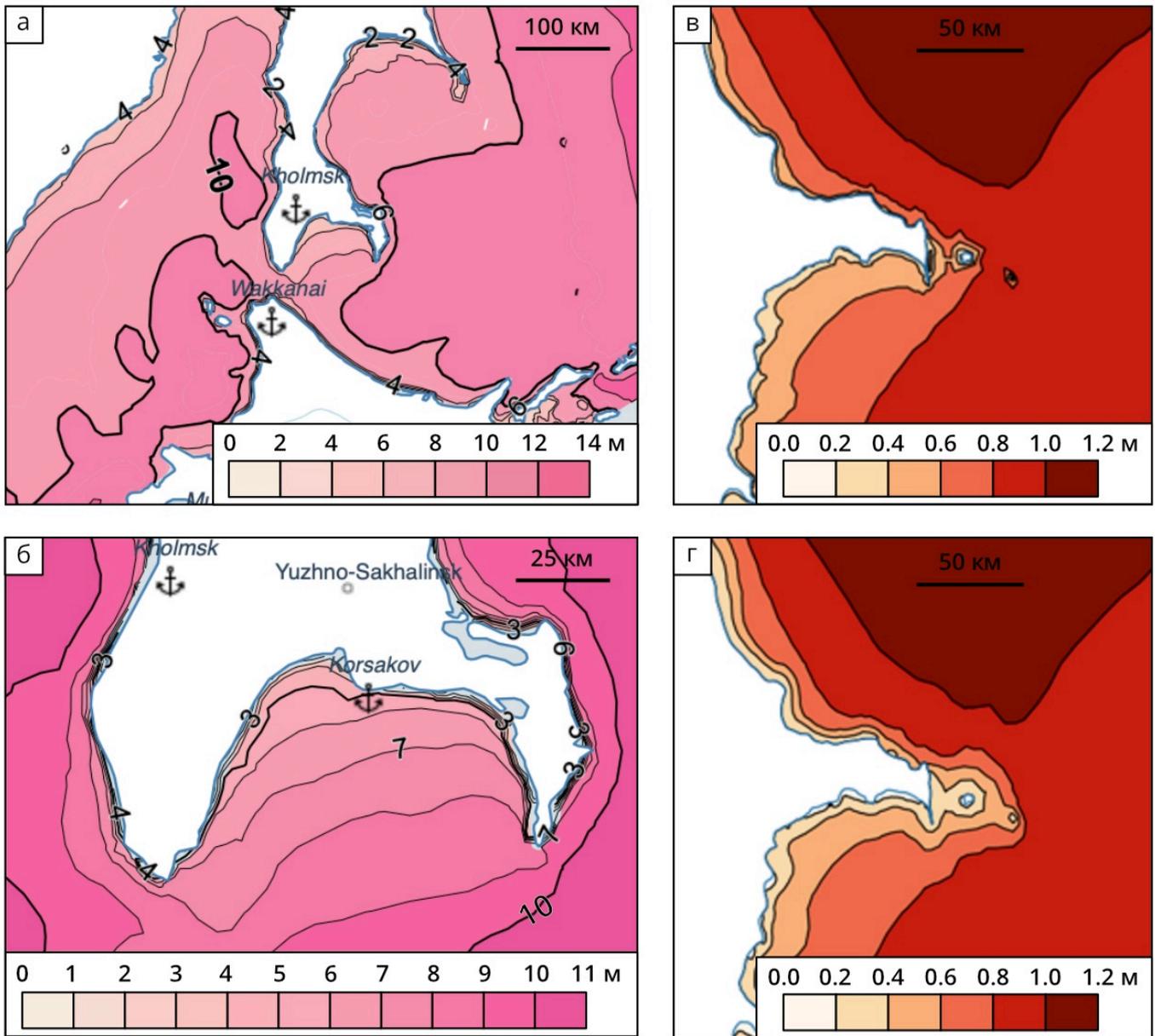


Рисунок 23. Мультимасштабное картографирование характеристик ветрового волнения: (а-б) максимальная высота волны, два масштабных уровня (юг о. Сахалин); (в) средняя высота волны, исходные данные; (г) средняя высота волны, результат сглаживания и утрирования (Апшеронский п-ов). Данные предоставлены С. А. Мысленковым

торных линий. Методика была апробирована на примере поиска полимагистралей по данным общегеографических карт России масштабов 1 : 1 000 000 и 1 : 2 500 000. Результаты автоматизированного выделения полимагистралей на территорию Волгоградской области по данным карты 1 : 1 000 000 с использованием разработанной методики отражает Рисунок 24. При анализе полученных изображений можно наблюдать последовательное преобразование изображения: рост количества полимагистралей с увеличением расстояния поиска (ширины коридора). Наиболее адекватным и приближенным к экспертному выделению полимагистралей представляется результат, полученный при расстоянии поиска 4 км.

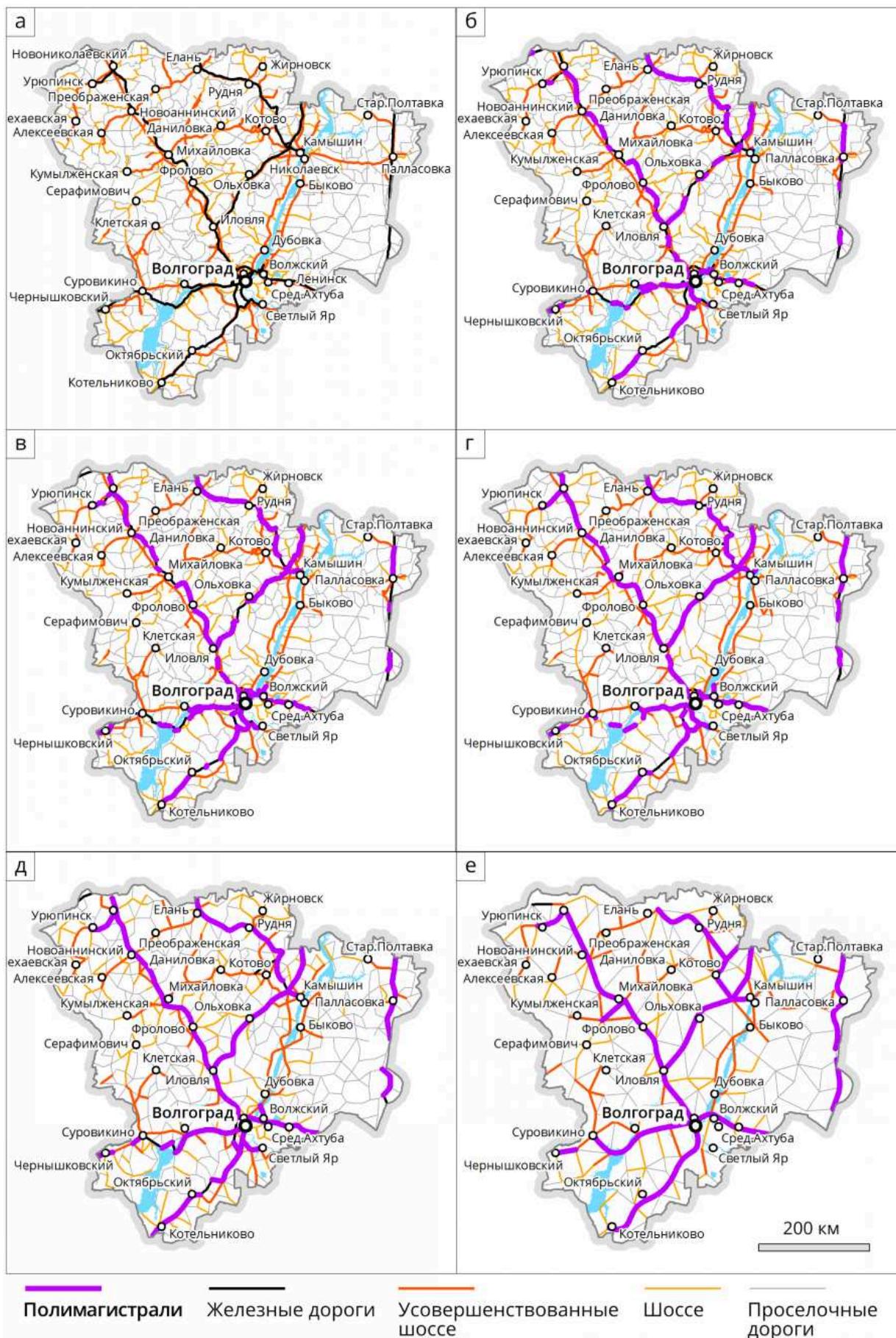


Рисунок 24. Полимагистралы Волгоградской области: (а) исходные данные с цифровой топографической карты масштаба 1 : 1 000 000; (б-е) полимагистралы, полученные при расстоянии поиска 1, 2, 4, 6, 12 км

Эффекты, связанные с построением и визуальной интерпретацией картограмм и картодиаграмм во множестве масштабов также являются недостаточно изученными [Besonnyte *et al.*, 2022]. Данная проблема была исследована в настоящей работе, в результате чего была предложена методика, позволяющая определять масштабы смены иерархических уровней административно-территориального деления (АТД) а также выполнять преобразования шкал цветов и размеров, способствующих оптимальной интерпретации социально-экономических карт, созданных способами картограмм и картодиаграмм [Самсонов, Юрова, 2014].

Для определения масштабов смены иерархических единиц предложено использовать соотношение знаменателя критического масштаба, и средней ширины минимального ограничивающего прямоугольника (МОП) для единиц АТД данного уровня на местности. Предложено несколько стратегий поведения шкал картодиаграмм, в которых при изменении масштаба и уровня детализации диаметр наиболее крупной градации остается неизменным или масштабируется. Для реализации предложенных подходов разработано специальное приложение *Multimapper*, уникальной особенностью которого является синхронное отображение нескольких масштабных уровней карты (Рисунок 25). Такой режим позволяет выполнять их сравнительный анализ, что облегчает проектирование логичной последовательности преобразований шкал размеров картодиаграмм.

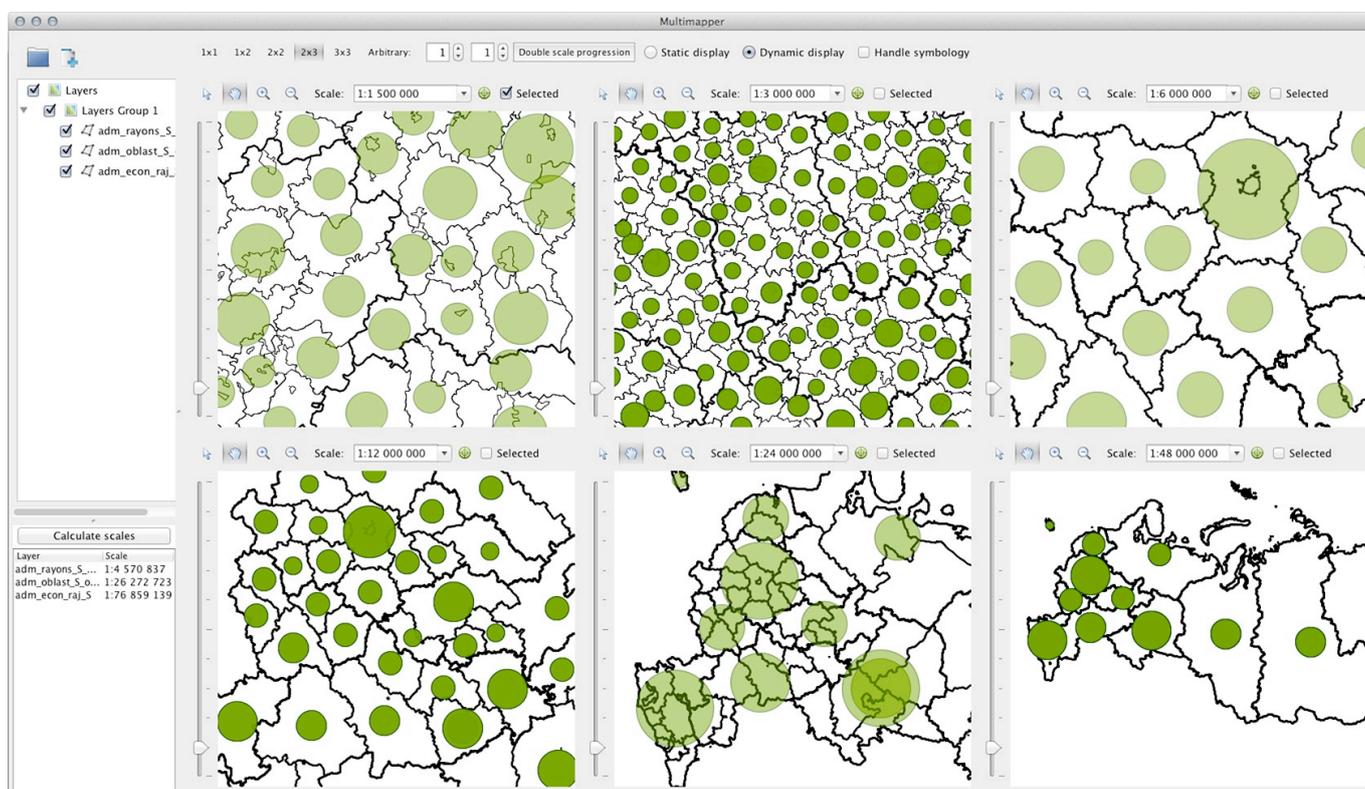


Рисунок 25. Приложение Multimapper для проектирования мультимасштабных социально-экономических карт

В способе картограмм при отображении минимального и максимального значения для i -го уровня с использованием позиций цветового градиента l_{min}^i и l_{max}^i , определяемых по формуле:

$$l_{min/max}^i = L_{min/max} + \Delta L \left[\frac{v_{min/max}^i - V_{min/max}}{\Delta V} \right]^r, \quad (2)$$

где $L_{min/max}$, $V_{min/max}$, $v_{min/max}^i$ — минимальное или максимальное значение позиции в цветовом градиенте, показателя по всем уровням АТД и показателя по i -му уровню АТД соответственно, $\Delta L = L_{max} - L_{min}$, $\Delta V = V_{max} - V_{min}$, r — степень чувствительности цветовой шкалы к изменению размаха вариации показателя. Уменьшение данного коэффициента от 1 до 0 позволяет сделать изменение границ шкалы более резистентным и замедлить уменьшение ее контрастности, что в свою очередь позволяет сохранить выразительность и наглядность цветовой шкалы при переходе к менее детальным масштабным уровням (Рисунок 26).

Также в рамках исследования предложен метод графического перехода между картограммами и картодиаграммами на разных масштабных уровнях, который обеспечил наглядную визуализацию происходящих при этом преоб-

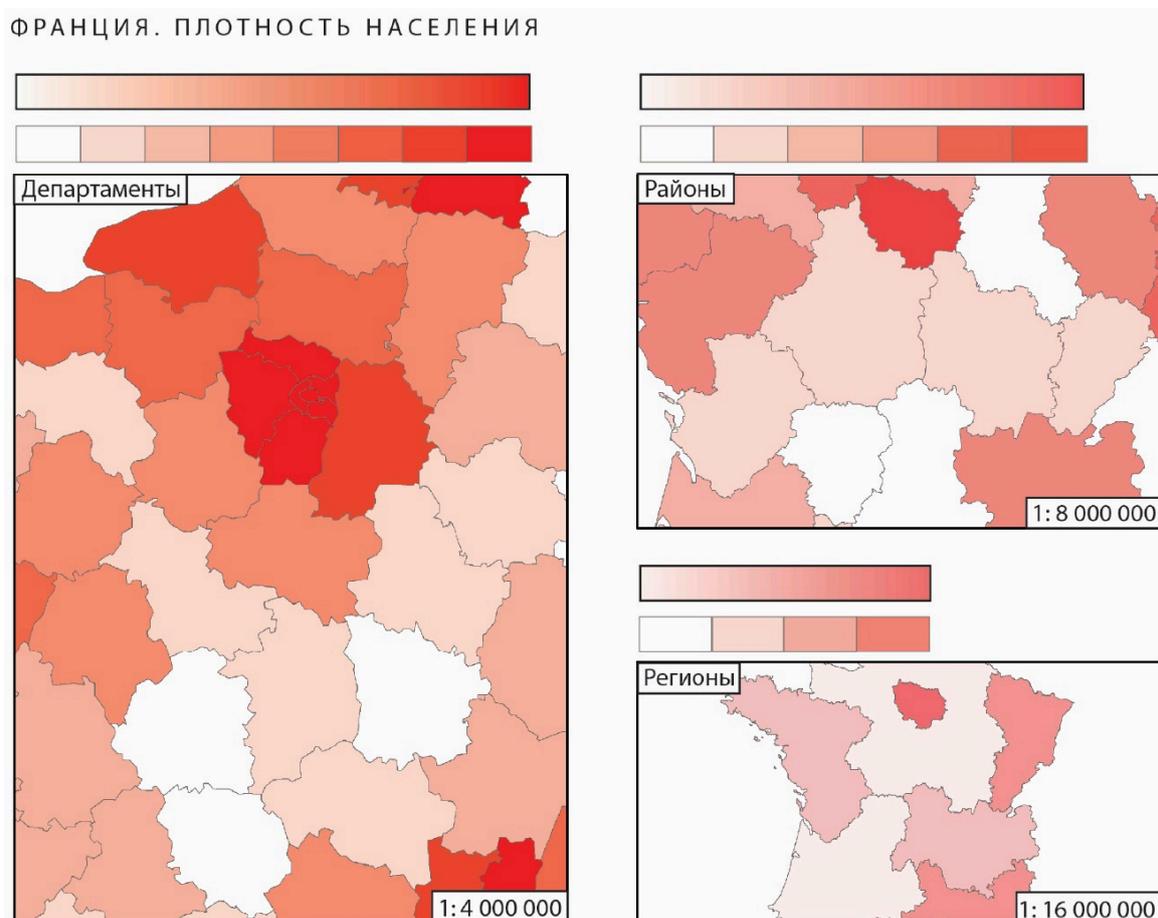


Рисунок 26. Адаптивное изменение цветовой шкалы картограмм на мультимасштабной карте плотности населения Франции

разований данных — нормирования (деления на площадь или отнесенный к ней показатель) и агрегирования (вычисления сводных статистик по группам территориальных единиц). Для достижения поставленной цели была разработана система переходов (Рисунок 27). В процессе анимации между состояниями происходит интерполяция координат границ и цвета заливки/обводки соответствующих элементов в соответствии с формулой:

$$s_t = (1 - t^\lambda)s_0 + t^\lambda s_1, \quad (3)$$

где s_0, s_1 — начальное и конечное состояние графического элемента, $0 \leq t \leq 1$ — параметр, λ — степень, визуально влияющая на скорость анимации рядом с начальным и конечным состоянием (при $\lambda = 1$ она постоянна). Агрегирование нормированных значений приводит к усреднению цветов картограмм, что отражает осреднение сгруппированных данных. В то же время агрегирование абсолютных значений визуализируется более выразительно — в форме объединения диаграмм муниципалитетов в диаграммы регионов.

Апробация произведена на примере данных по урожайности зерновых культур в Саратовской, Волгоградской и Ростовской областях за 2017 год (Рисунок 28). Смешанные преобразования, пересекающие по диагоналям данный рисунок, демонстрируют возможности одновременного отображения нормирования и агрегирования значений. Каждое смешанное преобразование может быть представлено как комбинация прямых (например, $e=a+v$).

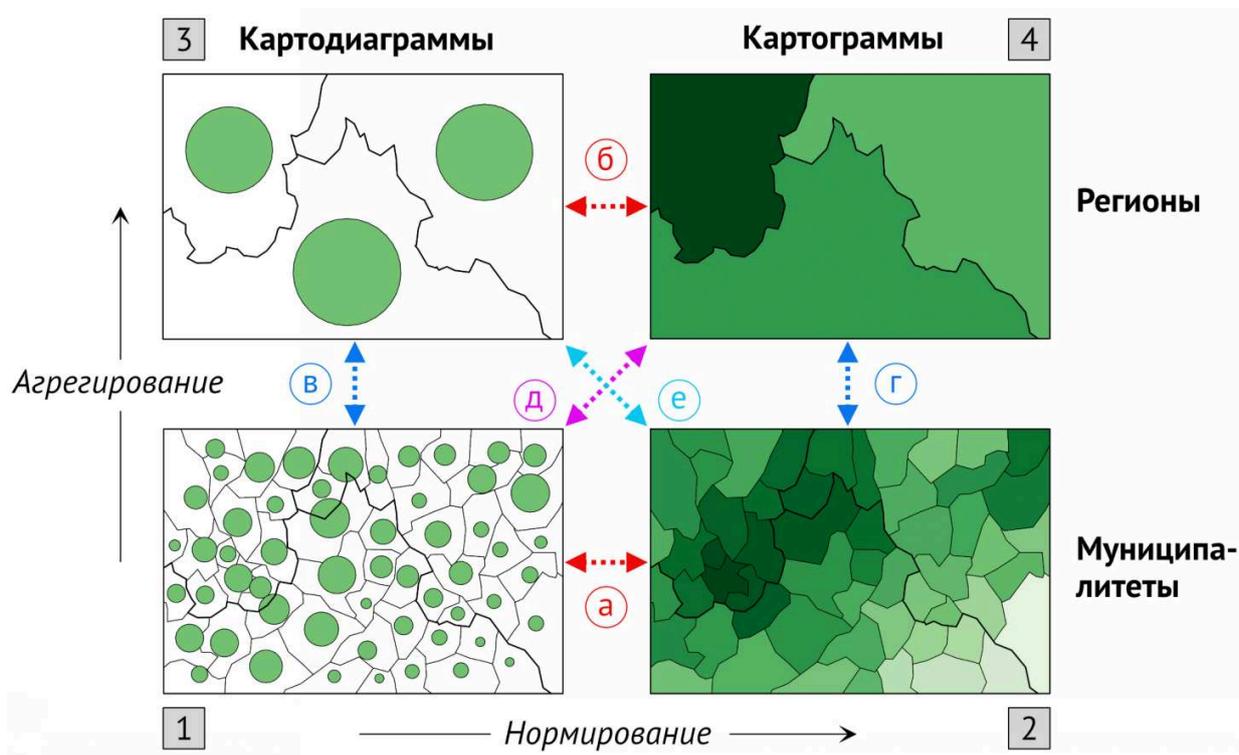


Рисунок 27. Исследуемая система картографических представлений (1-4) и переходов между ними (а-е)

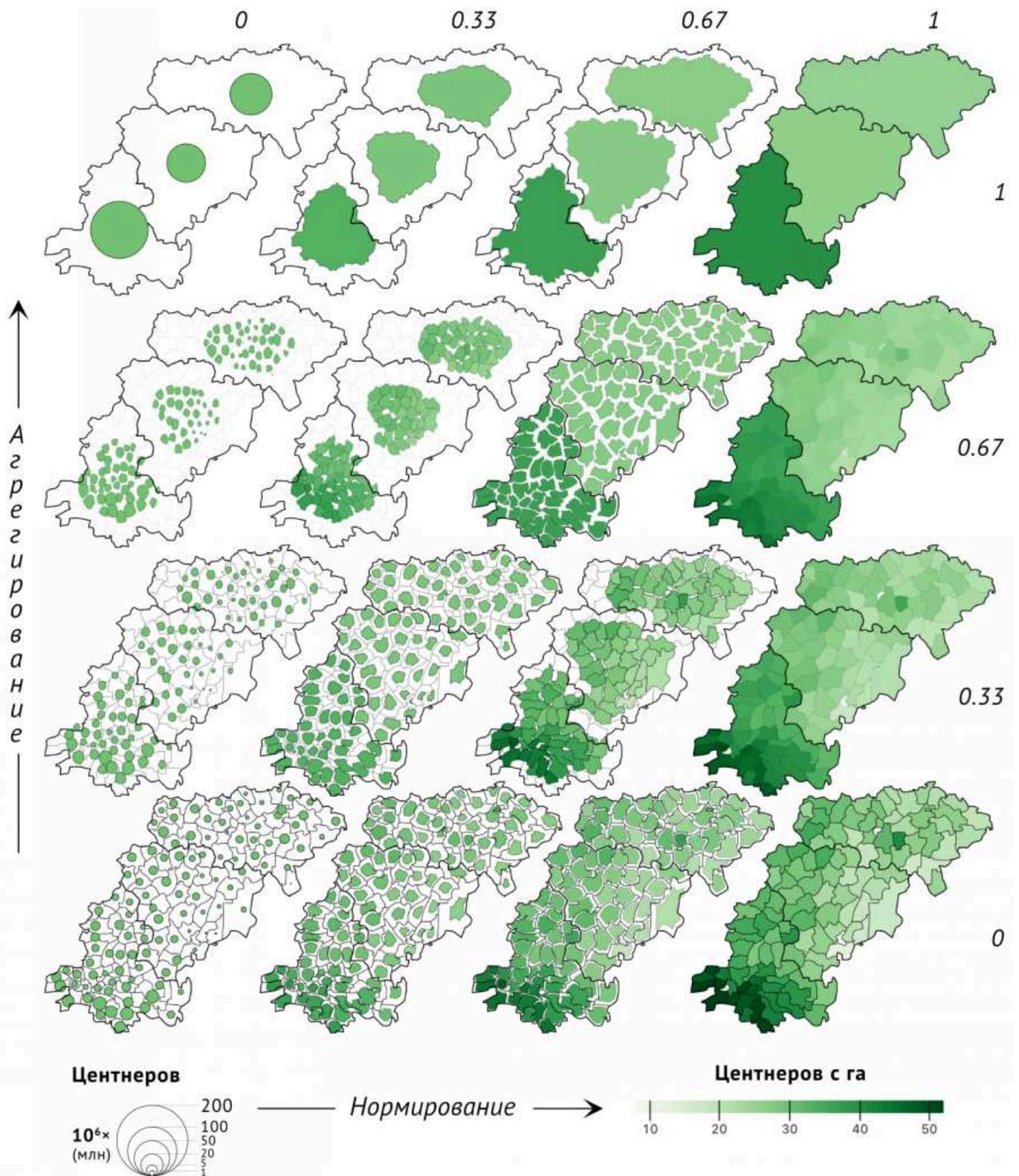


Рисунок 28. Анимации между представлениями данных об урожайности зерновых в виде картограмм и картодиаграмм (в Саратовской, Волгоградской и Ростовской областях России за 2017 г.). Значения параметра интерполяции подписаны по столбцам и строкам рисунка

Заключение

В результате выполненного исследования был пройден новый этап в развитии методологии генерализации пространственных данных для целей картографирования. Основные выводы заключаются в следующем:

1. Разработанные методы генерализации пунктов системы расселения и дорожной сети позволяют сохранить пространственный рисунок, плотность и связность соответствующих элементов при выполнении их отбора, а также выделить основные полимагистралы путем совмещения векторных линий, соответствующих сонаправленным путям сообщения.
2. Для сохранения характера формы и соседства линейных объектов необходимо выполнять сегментацию линий на участки различного морфологического типа, а также объединять их в сетевую структуру (граф), учитывая взаимные пересечения. При этом для генерализации естественных, схематичных и ортогональных сегментов следует использовать алгоритмы Ли-Оупеншоу, Дугласа-Пейкера и ортогональный соответственно, а для сохранения топологии — представление линий в виде графа.
3. Географически правдоподобная мелкомасштабная генерализация цифровых моделей рельефа (ЦМР) достигается путем восстановления обобщенной поверхности по тальвегам и водоразделам с последующим расширением долин и междуречий для усиления их визуального распознавания, при необходимости согласования результирующих отметок высот с заданным множеством генерализованных объектов гидрографии.
4. Генерализация пространственных данных урбанизированных территорий позволяет выполнять построение регулярно-сеточных баз данных городской среды путем агрегирования разнородной пространственной информации для численных моделей прогноза погоды, климатических и эколого-геохимических моделей.
5. Детальность пространственных данных в геометрической части может быть оценена по совокупности характеристик объектов и их множеств, монотонно реагирующих на последовательную генерализацию с учетом количественных характеристик сложности ландшафта; при этом достижение сопоставимой детальности разными алгоритмами может быть осуществлено путем предложенного метода регрессионного моделирования зависимости между их параметрами.
6. Детальность цифровых моделей рельефа для целей картографирования определяется совокупностью их пространственного разрешения и гранулярности. Относительная гранулярность ЦМР для мелкомасштабных

карт должна составлять 5 – 6 мм. При визуализации ЦМР на детальность изображения влияет как детальность ЦМР, так и параметры визуализации. В частности, при использовании горизонталей и штрихов детальность варьируется путем генерации дополнительных горизонталей с учетом автоматической оценки заложения и центральности, а также путем регулировки степени сглаживания, интервала и шага расстановки штрихов.

7. Автоматическое совмещение (конфляция) цифровой модели рельефа (ЦМР) и линейных объектов гидрографии разной детальности может быть достигнуто путем сдвига узлов ЦМР в направлении, локально определяемом суперпозицией векторов, заканчивающихся на гидрографических линиях и начинающихся на водотоках-контрагентах – путях на поверхности ЦМР, наиболее похожих по пространственному положению на объекты гидрографии и выделяемых автоматическим путем. Координатная привязка геоизображений произвольной детальности может быть осуществлена с использованием компьютерного зрения.
8. Построение мультимасштабных карт предполагает выполнение генерализации пространственных данных, а также преобразований графических средств и способов изображения, раскрывающих многоуровневые (в том числе, иерархические) аспекты картографируемого явления при переходе между масштабами. При этом преобразования могут носить не только вертикальный, но и горизонтальный характер. В частности, оператор утрирования разработанный для отображения высокоизменчивых прибрежных участков характеристик ветрового волнения, позволяет повысить наглядность карт путем смещения изолиний от берега.
9. Разработанные методы отображения структуры населенных пунктов, гипсометрического картографирования и картографирования характеристик ветрового волнения, построения полимагистралей, вычисления параметров картограмм и картодиаграмм позволяют автоматизировать составление мультимасштабных карт соответствующего содержания. При этом анимационные переходы между способами картографического изображения позволяют явным образом визуализировать происходящие при этом преобразования пространственных данных, а их применение на мультимасштабных картах обеспечивает возможность плавного перехода между масштабными уровнями.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования «eLibrary Science Index»:

1. Лурье И. К., **Самсонов Т. Е.** Структура и содержание базы пространственных данных для мультимасштабного картографирования // *Геодезия и картография*. — 2010. — № 11. — С. 17-23. EDN: [SOAXEZ](#) / 0,81 п.л. (IF SJR = 0.225, Q3). Вклад соискателя 80%.
2. **Самсонов Т. Е.**, Подольский А. С., Юрова Н. Д. Преобразования способов изображения и их соотношение с иерархией единиц картографирования // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. — 2013. — № 4. — С. 15-23. EDN: [RDWYWV](#) / 1,04 п.л. (IF SJR = 0.258, Q3). Вклад соискателя 50%.
3. **Самсонов Т. Е.**, Подольский А. С. Автоматизация вычисления параметров отображения дорожной сети и структуры населенных пунктов на мультимасштабных картах // *Геодезия и картография*. — 2014. — № 9. — С. 21-28. DOI: [10.22389/0016-7126-2014-891-9-21-28](#) / 0,5 п.л. (IF SJR = 0.225, Q3). Вклад соискателя 50%.
4. **Самсонов Т. Е.**, Юрова Н. Д. Применение картограмм и картодиаграмм на мультимасштабных социально-экономических картах // *Геодезия и картография*. — 2014. — № 11. — С. 30-38. DOI: [10.22389/0016-7126-2014-893-11-30-38](#) / 0,56 п.л. (IF SJR = 0.225, Q3). Вклад соискателя 50%.
5. **Самсонов Т. Е.** Якимова О. П., Алексеев В. В., Богаевская В. Г., Горохов А. А., Князев В. Н., Преображенская М. М., Ухалов А. Ю., Эдельсбруннер Х. Алгоритм геометрического упрощения множества линий путем стягивания ребер графа с сохранением топологии // *Геодезия и картография*. — 2014. — № 3. — С. 29-36. DOI: [10.22389/0016-7126-2014-885-3-29-36](#) / 0,5 п.л. (IF SJR = 0.225, Q3). Вклад соискателя 50%.
6. **Самсонов Т. Е.**, Кривошеина А. М. Автоматизация отбора населенных пунктов с учетом пространственной неравномерности их распределения для целей мелкомасштабного картографирования // *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. — 2015а. — № 1. — С. 74-82. EDN: [RTPVYG](#) / 0,56 п.л. (IF РИНЦ = 0.234, K1). Вклад соискателя 50%.
7. **Самсонов Т. Е.**, Кривошеина А. М. Генерализация дорожной сети в мелких масштабах картографирования с сохранением связности населенных пунктов // *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. — 2015б. —

№ 2. — С. 23-30. EDN: [TTAFZL](#) / 0,5 н.л. (IF PИИЦ = 0.234, K1). Вклад соискателя 50%.

8. **Самсонов Т. Е.**, Тригуб К. С. Картографирование локальных климатических зон Москвы по космическим снимкам // *Геодезия и картография*. — 2018. — Т. 79. — № 6. — С. 14-25. DOI: [10.22389/0016-7126-2018-936-6-14-25](#) / 0,63 н.л. (IF SJR = 0.225, Q3). Вклад соискателя 50%.
9. **Самсонов Т. Е.**, Прохорова Е. А. Генерализация транспортных сетей при мультимасштабном картографировании // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. — 2019. — № 1. — С. 107-117. DOI: [10.31857/S2587-556620191107-117](#) / 0,69 н.л. (IF SJR = 0.217, Q2). Вклад соискателя 75%.
10. Мухаметшин А. Р., **Самсонов Т. Е.**, Лурье И. К. Координатная привязка геоизображений с использованием компьютерного зрения // *Геодезия и картография*. — 2024. — № 5. — С. 24-36. DOI: [10.22389/0016-7126-2024-1007-5-24-36](#) / 0,81 н.л. (IF SJR = 0.225, Q3). Вклад соискателя 30%.
11. **Samsonov T.** Morphometric Mapping of Topography by Flowline Hachures // *The Cartographic Journal*. — 2014. — Vol. 51. — № 1. — pp. 63-74. DOI: [10.1179/1743277413Y.0000000036](#) / 0,75 н.л. (IF JIF = 1.000, Q3). Вклад соискателя 100%.
12. **Samsonov T.** Review of Abstracting Geographic Information In a Data Rich World: Methodologies and Applications of Map Generalisation // *Cartographic Perspectives*. — 2015. — no. 80. — pp. 54–57. DOI: [10.14714/CP80.1308](#) / 0,25 н.л. (IF JIF = 0.133, Q4). Вклад соискателя 100%.
13. **Samsonov T.**, Konstantinov P., Varentsov M. Object-oriented approach to urban canyon analysis and its applications in meteorological modeling // *Urban Climate*. — 2015. — Vol. 13. — pp. 122-139. DOI: [10.1016/j.uclim.2015.07.007](#) / 1,13 н.л. (IF JIF = 6.000, Q1). Вклад соискателя 50%.
14. **Samsonov T.**, Yakimova O. Shape-Adaptive Geometric Simplification of Heterogeneous Line Datasets // *International Journal of Geographical Information Science*. — 2017. — Vol. 31. — № 8. — pp. 1485-1520. DOI: [10.1080/13658816.2017.1306864](#) / 2,25 н.л. (IF JIF = 4.300, Q1). Вклад соискателя 75%.
15. **Samsonov T.**, Koshel S., Walther D., Jenny B. Automated placement of supplementary contour lines // *International Journal of Geographical Information Science*. — 2019. — Vol. 33. — № 10. — pp. 2072-2093.

DOI: [10.1080/13658816.2019.1610965](https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1610965) / 1,38 н.л. (IF JIF = 4.300, Q1). Вклад соискателя 50%.

16. **Samsonov T. E.** Automated Conflation of Digital Elevation Model with Reference Hydrographic Lines // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. — 2020. — Vol. 9. — № 5 (334). — pp. 1-40. DOI: [10.3390/ijgi9050334](https://doi.org/10.3390/ijgi9050334) / 2,56 н.л. (IF JIF = 2.800, Q2). Вклад соискателя 100%.
17. **Samsonov T. E.**, Varentsov M. I. Computation of City-descriptive Parameters for High-resolution Numerical Weather Prediction in Moscow Megacity in the Framework of the COSMO Model // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2020. — Vol. 45. — № 7. — pp. 515-521. DOI: [10.3103/s1068373920070079](https://doi.org/10.3103/s1068373920070079) / 0,44 н.л. (IF JIF = 1.400, Q4). Вклад соискателя 50%. [Русскоязычная версия: **Самсонов Т. Е.**, Варенцов М. И. Определение параметров городской среды Московского мегаполиса для детализированного численного прогноза погоды в рамках модели COSMO // *Метеорология и гидрология*. — 2020. — № 7. — С. 112–119. EDN: [IRDBCD](https://www.edn.ru/IRDBCD/) / 0,5 н.л. (IF РИНЦ = 1.415, K1). Вклад соискателя 50%.]
18. **Samsonov T.**, Yakimova O. Regression modeling of reduction in spatial accuracy and detail for multiple geometric line simplification procedures // *International Journal of Cartography*. — 2020. — Vol. 6. — № 1. — pp. 47-70. DOI: [10.1080/23729333.2019.1615745](https://doi.org/10.1080/23729333.2019.1615745) / 1,5 н.л. (IF JIF = 0.400, Q4). Вклад соискателя 75%.
19. Varentsov M., **Samsonov T.**, Demuzere M. Impact of Urban Canopy Parameters on a Megacity's Modelled Thermal Environment // *Atmosphere*. — 2020. — Vol. 11. — № 12 (1349). — pp. 1-31. DOI: [10.3390/atmos11121349](https://doi.org/10.3390/atmos11121349) / 2,0 н.л. (IF JIF = 2.500, Q3). Вклад соискателя 20%.
20. **Samsonov T.** Granularity of Digital Elevation Model and Optimal Level of Detail in Small-Scale Cartographic Relief Presentation // *Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 14. — № 5 (1270). — pp. 1-40. DOI: [10.3390/rs14051270](https://doi.org/10.3390/rs14051270) / 2,56 н.л. (IF JIF = 4.200, Q1). Вклад соискателя 100%.
21. Kosheleva N. E., Vlasov D. V., Timofeev I. V., **Samsonov T. E.**, Kasimov N. S. Benzo[a]pyrene in moscow road dust: pollution levels and health risks // *Environmental Geochemistry and Health*. — 2023. — Vol. 45 (1287). — pp. 1669-1694. DOI: [10.1007/s10653-022-01287-9](https://doi.org/10.1007/s10653-022-01287-9) / 1,63 н.л. (IF JIF = 3.200, Q2). Вклад соискателя 20%.
22. Myslenkov S., **Samsonov T.**, Shurygina A., Kiseleva S., Arkhipkin V. Wind waves web atlas of the Russian seas // *Water*. — 2023. — Vol. 15, no. 11 (2036).

— pp. 1-18. DOI: [10.3390/w15112036](https://doi.org/10.3390/w15112036) / 1,19 н.л. (IF JIF = 3.000, Q2). Вклад соискателя 20%.

23. **Samsonov T.**, Yakimova O., Potemkin D., Guseva O. Spatial variation of feature density in multiscale topographic data // *GEOGRAPHY. ENVIRONMENT. SUSTAINABILITY*. — 2023. — Vol. 16. — № 1. — pp. 86-102. DOI: [10.24057/2071-9388-2022-127](https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-127) / 1,06 н.л. (IF SJR = 0.349, Q2). Вклад соискателя 60%.

Монографии

24. **Самсонов Т. Е.** Мультимасштабное картографирование рельефа: общегеографические и гипсометрические карты. — *LAP Lambert Academic Publishing Saarbrücken*, 2011. — 208 с.

Прочие издания

25. **Самсонов Т. Е.** Мультимасштабное картографирование — новое направление картографии // *Современная географическая картография* / под ред. И.К.Лурье и В.И.Кравцовой. — Дата+ Москва: 2012. — С. 21–35.
26. **Самсонов Т. Е.** Картографические методы визуализации и генерализации цифровых моделей рельефа // *Геоморфологи: Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа в науках о Земле.* / под ред. А.В.Кошкарева — Вып. 6. — Медиа-ПРЕСС Москва: 2016. — С. 9–18.
27. **Самсонов Т. Е.** Современная геоинформатика и ее роль в развитии картографии и взаимодействии географических наук // *Картография в цифровую эпоху* / под ред. В. М. Котлякова, И. К. Лурье, А. А. Медведева, Т. Е. Самсонова. — Вопросы географии, Т. 144 — Издательский дом Кодекс, Москва: 2017. — С. 52–72.
28. **Самсонов Т. Е.**, Ривин Г. С., Варенцов М.И. Моделирование метеорологических условий городской атмосферы // *Климат Москвы в условиях глобального потепления* / под ред. Кислова А.В. — Издательство МГУ. — Москва, 2017. — С. 33-89.
29. Мысленков С.А., **Самсонов Т.Е.**, Киселева С.В., Архипкин В.С., Шестакова А.А., Умнов П.М. Разработка веб-атласа доступной энергии волн и ветра прибрежной зоны морей России: информационное и картографическое обеспечение // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. — 2018. — № 16-18. — С. 39–54. DOI: [10.15518/isjaee.2018.16-18.039-054](https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.16-18.039-054)

30. Мысленков С. А., **Самсонов Т. Е.**, Шурыгина А. А., Киселева С. В., Архипкин В. С., Шестакова А. А., Суркова, Г. В., Сильвестрова К. П., Умнов П. М. Разработка веб-атласа доступной энергии волн и ветра прибрежной зоны морей России: веб-интерфейс и аналитические функции // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. — 2020. — № 7-18 (330-341). — С. 44–59. DOI: [10.15518/ijjaee.2020.07-18.44-59](https://doi.org/10.15518/ijjaee.2020.07-18.44-59)
31. **Samsonov T.** Multiscale Hypsometric Mapping // *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* / ed. by A. Ruas. – Vol. 1. — Springer: Berlin, Heidelberg — 2011. — pp. 497-520.
32. **Samsonov T.**, Jenny B. Small-scale and Multi-scale Relief Mapping // *Mountain Cartography: 16 Years ICA Commission on Mountain Cartography*. — Vol. 21 of Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie. — University of Vienna Vienna, Austria: 2015. — pp. 77–86.
33. **Samsonov T.** Spatial Analysis and Modelling // *The Routledge Handbook of Geospatial Technologies and Society*. — Abingdon, Oxfordshire, UK, England: Routledge (Taylor and Francis), 2023. — pp. 263–290.

Свидетельства о регистрации прав на программы для ЭВМ

1. Преображенская М.М., Алексеев В.В., **Самсонов Т.Е.** Программа для вычисления топологических характеристик географических карт. *Свидетельство о регистрации № 2016616516 от 15 июня 2016 г.*
2. Якимова О.П., **Самсонов Т.Е.** MapSimplify 2.0 — научно-исследовательская программа для картографической генерализации линейных объектов смешанного характера. *Свидетельство о регистрации № 2017610341 от 10 января 2017 г.*
3. Якимова О.П., **Самсонов Т.Е.** Научно-исследовательская программа согласования параметров алгоритмов геометрического упрощения для получения сходных по детализации результатов. *Свидетельство о регистрации № 2021611919 от 8 февраля 2021 г.*
4. **Самсонов Т.Е.**, Варенцов М.И. Программный комплекс подготовки данных о геометрии городской застройки и подстилающей поверхности для детализированного численного прогноза погоды и метеорологического моделирования. *Свидетельство о регистрации № 2024687849 от 21 ноября 2024 г.*