ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
КАФЕДРА КАРТОГРАФИИ И ГЕОИНФОРМАТИКИ

Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

УНИВЕРСИТЕТ
книжный дом

УДК 528.9
ББК 26.1
Н34

Главный редактор:
А.М. Карпачевский – старший научный сотрудник кафедры, кандидат географических наук.

Редакционная коллегия:
Е.А. Прохорова – доцент кафедры, кандидат географических наук;
П.Г. Илюшина – научный сотрудник кафедры, кандидат географических наук;
А.Л. Энтин – старший научный сотрудник кафедры, кандидат географических наук.

Н34 **Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова**: сборник статей, [электронное издание сетевого распространения] / Под ред. А.М. Карпачевского. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. – 148 с. – URL: https://bookonlime.ru/node/48203 – doi: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1262-4-2022-148.

ISBN 978-5-7913-1262-4

В сборник вошли лучшие научные работы студентов кафедры, выполненные в 2021-2022 учебном году под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Издание посвящен 90-летию кафедры картографии и геоинформатики и представляет собой набор статей по основным направлениям исследований на кафедре в области картографии, геоинформатики и дистан-ционного зондирования, пространственного анализа и моделирования.

УДК 528.9
ББК 26.1

Электронное издание сетевого распространения.
Макет подготовлен заказчиком. Опубликовано 23.11.2022.
Издательство «КДУ»: 8(495) 638-57-34. www.kdu.ru

ISBN 978-5-7913-1262-4

© Коллектив авторов, 2022
© Издательство «КДУ», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

От редколлегии 2

Барышкин П.А., Алексеенко Н.А. Изучение структуры жилищного фонда шахтерских моногородов с помощью картографического метода (на примере городов Кимовск и Кировск) 3

Белан П.М., Прохорова Е.А., Семин В.Н. Методика генерализации при построении графа железных дорог России на основе данных OpenStreetMap 13

Корнилов Д.А., Прохорова Е.А. Возможности представления на картах велоинфраструктуры города (на примере ЮЗАО г. Москвы) 22

Кузнеченко П.А., Алексеенко Н.А., Медведев А.А. Картографирование изменений типов берега озера Севан в условиях регуляции уровня воды 32

Михайлова М.В., Ныpцов М.В. Моделирование Фобоса на основе референц-поверхности трехосного эллипсоида 44

Мурман А.С., Энтин А.Л. Совершенствование методики интерполяции высот горизонталей для расчета морфометрических величин 52

Мухаметшин А.Р., Самсонов Т.Е. Дешифрирование космических снимков с использованием машинного обучения по данным OpenStreetMap 64

Пинигин Г.В., Самсонов Т.Е. Автоматизированное построение схематизированных ленточных знаков распределительного типа 73

Развенков П.А., Каргашин П.Е. Дешифрирование кустовых площадок в различных природных зонах с помощью сверточных нейронных сетей 83

Ромах Е.А., Карпачевский А.М. Картографирование изменения транспортной доступности районов Москвы 95

Сохранных В.А., Самсонов Т.Е. Геоинформационное моделирование речной сети на основе векторных данных с неопределенным направлением линий водотоков 104

Хлюстова В.В., Балдина Е.А. Опыт использования высокодетальных данных дистанционного зондирования для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур 114

Шилякина М.Н., Карпачевский А.М., Котов Е.А. Возможности анализа городской активности на основе сетевых моделей 126

Ширяев М.А., Балдина Е.А. Картографирование арктического острова Визе по данным радиолокационной съемки 136

От редколлегии

Сборник научных статей, который предлагается читателю – результат совместных изысканий ведущих сотрудников и студентов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова и посвящен 90-летнему юбилею ее создания. В нем собраны лучшие работы 2021–2022 учебного года, которые были защищены как курсовые и выпускные квалификационные работы в бакалавриате и магистратуре.

Можно с уверенностью сказать, что представленные четырнадцать работ являются своего рода «срезом» современного геоинформационного картографирования и аэрокосмических методов исследования. Они дают представление о направлениях и тенденциях в научной работе кафедры. Здесь есть все, что составляет суть картографии и геоинформатики: вопросы составления карт на основе баз данных, возможности визуализации, картографическое моделирование и формирование производных карт, разработки в области автоматизации процессов проектирования и использования карт. Некоторые из представленных работ знакомят нас с трехмерным виртуальным моделированием на примере космических тел с использованием трехосных эллипсоидов, построением цифровых моделей рельефа, а также геоинформационными методами моделирования гидрографической сети и исправлением ошибок и артефактов, присущих данным о высотах земной поверхности и объектам гидрографии. В рамках развития аэрокосмических методов можно найти как «классические» работы по дешифрированию, так и работы с использованием сверточных нейронных сетей, сопоставлением данных наземного спектрометрирования и космической съемки. На кафедре активно развиваются методы анализа географических сетей на примере городского транспорта и улично-дорожной сети. Картография, геоинформатика и дистанционное зондирование активно взаимодействуют с другими географическими науками, что проявляется как в исследовании динамики природных объектов (типов берегов озера Севан), так и социально-экономических явлений (структуры жилищного фонда шахтерских моногородов в условиях городского сжатия).

Опыт становления исследователя-картографа, активно и с интересом участвующего в научных исследованиях, является необходимым звеном в подготовке и воспитании будущих ученых. Именно с реализации первых студенческих работ начинается профессиональное становление не только ученых-исследователей, но и компетентных специалистов в самом широком понимании. Мы будем считать задачу по формированию сборника выполненной, если он зародит у читателей интерес к поставленным проблемам, желание у будущих студентов продолжать их изучение, развивать методы и технологии картографии и геоинформатики сегодняшнего дня.

Изучение структуры жилищного фонда шахтерских моногородов с помощью картографического метода (на примере городов Кимовск и Кировск)

Барышкин П.А., Алексеенко Н.А

Работа посвящена разработке методики картографирования структуры и динамики жилищного фонда шахтерских моногородов – Кимовска (Тульская обл.) и Кировска (Мурманская обл.), – находящихся в особенно сложной экономической ситуации и подвергнутых явлению городского сжатия – сокращения численности населения с сопутствующим опустением жилых зданий. Описан процесс подбора материалов, необходимых для картографирования, технические особенности составления карт. Проведено полевое исследование населенных пунктов в целях верификации имеющихся данных и получении дополнительной информации. В результате были составлены по две карты на каждый город, иллюстрирующих структуру и динамику структуры жилищного фонда. На основе анализа карт были сделаны выводы о кольцующем рисунке сжатия в Кимовске и очаговом городском сжатии в Кировске, о возможностях применения разновременных космических снимков и статистических данных для картографирования, различных по своему экономико-географическому положению. Выявлено перемещение ядер концентрации населения во времени от районов добычи к историческим центрам городов.

Ключевые слова: городское сжатие, депопуляция, картографирование, разновременные данные, космические снимки, полевое исследование

Structure of Russian mining single-industry towns housing stock: studying using cartographic method (case of Kimovsk and Kirovsk)

Baryshkin P.A., Alekseenko N.A.

In this study, we developed the mapping methodology of structure and dynamics mining single-industry towns (Kimovsk, Tula Region, and Kirovsk, Murmansk Region) living area. Both these towns are in a difficult economic situation. Towns are subjected to the phenomenon of the urban shrinkage. The mapping material selection process and the technical features of mapping are described. A field studies of settlements were held to verify the available data and obtain additional information. As a result, two maps were made for each city. First map illustrates the structure of the housing stock and second map – dynamics of this structure. Based on the maps analysis, the ringing pattern of urban shrinkage in Kimovsk and the focal pattern in Kirovsk are spotted. Moreover, the different possibilities of using multi-temporal remote sensing data and statistical data for mapping are revealed depending on geographical position of settlements. Also, the dynamics of population concentration cores are detected. These cores moved from mining districts to the town historical center.

Keywords: urban shrinkage, depopulation, mapping, multi-temporal, remote sensing data, field study

Введение

Для процесса депопуляции с сопутствующим опустением жилых зданий используется термин «городское сжатие». *Городское*

сжатие – это сокращение населения вопреки «нормальному» и желаемому росту с одновременным опустением жилых зданий, когда после смены политического строя государства или иного переломного фактора наблюдается экономическая и демографическая нестабильность. Специалисты в области урбанистики Западной Европы и США уделяют особое внимание приуроченности исследуемого явления к отдельным населенным пунктам [Großman et al., 2013; Oswalt et al., 2006]. Основанием для выявления городского сжатия в конкретном поселении может служить устойчивое сокращение численности населения более 1% от общей людности ежегодно и имеющийся факт опустения жилых зданий.

Масштабы городского сжатия растут с каждым годом вместе с ускоряющейся глобализацией. «Глобальные города» – населенные пункты, играющие ключевую роль в мировой экономической системе в современное время, – «стягивают» трудовые ресурсы. Остальные регионы и города испытывают отток населения, а значит нехватку инвестиций, низкий уровень экономического развития и предпринимательской деятельности [Martinez-Fernandez et al., 2012]. Возникает структурный кризис, который характеризуется деградацией социальной инфраструктуры и экономики города. Особенно сильно данные процессы повлияли на моногорода – населенные пункты, хозяйства которых основаны на одном градообразующем предприятии, деятельность которого обеспечивает работой более 30% населения города [Распоряжение…, 2020]. На 2022 год в России насчитывается 319 моногородов, большинство из которых испытывает сокращение численности населения [Распоряжение…, 2019]. Закрытие крупных градообразующих предприятий приводит к особо сложной экономической и демографической ситуации в населенных пунктах, поэтому изучаемая проблема в таких городах будет стоять особенно остро.

Отличие явления городского сжатия от депопуляции в том, что учитывается также пространственное распространение явления. Это позволяет проводить картографирование сжатия, благодаря чему становится возможным получить новые знания об объекте исследования. Количество работ, включающих картографические изображения крупного масштаба, иллюстрирующие исследуемое явление немногочисленны [Przemiany…, 2012; Kantor-Pietraga, 2021; Gunko et al., 2021]. Вследствие этого, целью работы стала разработка методики картографирования структуры жилищного фонда шахтерских моногородов в условиях современной экономической ситуации в России. В качестве объектов было выбрано два шахтерских моногорода: Кимовск (Тульская обл.) и Кировск (Мурманская обл.). Несмотря на схожие функции, населенные пункты находятся в сильно различных географических условиях и специализируются на разных типах полезных ископаемых (уголь и апатито-нефелиновая руда соответственно). Такие различия позволят оценить возможности использования методики картографирования.

Материалы и методы

Картографирование шахтерских моногородов на предмет изучения городского сжатия требует использования большого набора данных с высокой степенью детализации: визуализация должна проходить в масштабе отдельных объектов жилищной инфраструктуры – зданий. Для таких задач были привлечены следующие материалы:

- разновременные космические снимки сверхвысокого пространственного разрешения;
- данные картографического сервиса *OpenStreetMap*;

- генеральные планы муниципальных образований;
- данные статистики жилищного фонда портала «Реформа ЖКХ»;
- данные полевых наблюдений населенных пунктов.

На основе материалов *OpenStreetMap* (векторных полигональных слоев жилых зданий) проведено исследование структуры городов. Из-за неполного покрытия населенных пунктов данными были использованы космические снимки для уточняющей векторизации. Также с помощью данных дистанционного зондирования проводилось выявление факта сноса и постройки зданий за периоды между съемками.

В работе использованы снимки с вебсервисов (*USGS EarthExplorer: IKONOS*), а также полученные при содействии Института географии РАН (*Keyhole, OrbView-3)* и Центра коллективного пользования «Геопортал» (*Pleiades 1-B, Spot-6,7*). Спутниковые изображения позволили обеспечить достаточное пространственное и временное (по одному снимку на каждые 5 лет изменений) покрытие территории населенных пунктов для изучения городского сжатия.

В рамках работы привлечены картографические материалы генеральных планов муниципальных образований, которые были использованы для выделения структуры функциональных зон населенных пунктов в целом и, в частности, жилой зоны. Встречающаяся неактуальность генеральных планов муниципальных образований является существенной проблемой для исследования динамических явлений. Так, например, актуальная редакция генерального плана муниципального образования города Кимовск принята в 2017 г. В качестве альтернативы были использованы проекты генеральных планов.

Анализ внутренней структуры жилищного фонда был проведен на основе данных статистики фонда «Реформа ЖКХ». База данных фонда позволяет получить подробную информацию о домах и деятельности управляющих организаций. Для получения пар координат каждого здания проводилось геокодирование.

Для картографирования исследуемого явления были изучены существующие в работах специалистов картографические произведения и отмечены проиллюстрированные на них показатели. Были выделены такие показатели, как возраст жилых зданий города [Przemiany…, 2012], время сноса жилых зданий и площадь селитебной зоны [Gunko et al., 2021], взаимное расположение открытых/закрытых разработок полезных ископаемых и городских районов, подверженных городскому сжатию [Constantinescu, 2012]. Помимо этого, для анализа различий во внутренней структуре жилищного фонда было решено проиллюстрировать показатели этажности жилых зданий, удельной жилой площади (жилой площади, приходящейся на одного человека) и удаленности жилых зданий от центральной части города, которые могут позволить получить дополнительную информацию об изменениях.

Методика расчета и визуализации исследуемых показателей основана на векторизации имеющихся растровых карт функционального зонирования и перспективного развития генеральных планов населенных пунктов, работе с атрибутивной информацией исходных векторных слоев, создании сетевой модели и проведении плотностной кластеризации для расчета удаленности объектов от центральной части города. Далее рассмотрим особенности визуализации показателей на карте.

Способом значков с переменным цветом изображены отдельные жилые здания. В качестве ступеней временной шкалы взяты обобщенные эпохи правления государственных лидеров (рисунок 1). Такое

деление является оправданным, так как картографируемое явление описывает в том числе темпы жилищного строительства, которые определяются экономической политикой государства (в особенности до 1991 года).

Рисунок 1 – Цветовая шкала возраста построек для пунсонов жилых зданий

Этажность необходимо проиллюстрировать для учета общего характера застройки:

- Строительство многоэтажных зданий может говорить о высоком спросе на недвижимость в период их возведения, а значит и об экономическом росте в конкретное время;
- Кварталы с большой площадью жилых помещений на душу населения, застроенные многоэтажными зданиями, свидетельствуют о большем количестве гипотетически пустующих квартир, чем в малоэтажных кварталах.

В России нет строго установленной классификации зданий по числу этажей, однако в СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» упоминается этажность в фокусе определения размеров территорий жилых зон в расчете на 1 000 чел. В СП приведена следующая классификация:

- 9 этажей и выше;
- 4–8 этажей;
- 2–3 этажа;
- усадебная застройка (1 этаж).

Данная градация была применена для задач картографирования.

Для анализа городского сжатия важным показателем служит размер жилой площади, приходящейся на одного человека (удельная жилая площадь). Был использован способ картограммы, где в качестве единиц территориального деления были приняты городские кварталы в соответствии с генеральным планом. В качестве граничных значений для ступеней шкалы картограммы были использованы нормы жилой площади на одного человека, предусмотренные №283-ФЗ: менее 18 (выше нормы), 18–22, 22–33, более 33 м^2 (ниже нормы).

В работах ученых по изучению городского сжатия [Hollander et al., 2011, Schilling et al., 2008] уделяется внимание периферийному характеру явления в изучаемых городах. Поэтому важно уделить внимание удаленности городских кварталов от центра населенного пункта, части территории города, на которой сосредоточены общественные здания и сооружения общегородского и внегородского значения [Терминологический…, 1986]. Работы по автоматизированному выделению центров населенных пунктов основаны на использовании имеющихся данных о жилых зонах и объектах города с топографических планов и спутниковых снимков [Lüscher et al., 2013]. Для выделенных функциональных зон проводится триангуляция Делоне между центроидами коммерческих и социальных зон и последующего удаления ребер триангуляционной сети путем применения глобальной и локальной фильтрации [Zhu et al., 2017]. В качестве альтернативы глобальной и локальной фильтрациям было предложено использовать точечную кластеризацию *DBSCAN*. Алгоритм основан на выделении плотно сгруппированных в пространстве совокупностей точек, что подходит для выделения сконцентрированных центроидов коммер-

ческих и общественно-деловых зон в центральной части города. На основе рассчитанных кластеров проводился расчет расстояний по сетевой модели дорог населенных пунктов с использованием набора инструментов *Network Analyst ArcGIS*. Для каждого города был создана транспортная модель на основе графа дорог (перед созданием проведена его планаризация) и была решена задача построения областей обслуживания (*Service Area*).

Таким образом, на рисунке 2 представлена технологическая схема использования данных различных источников при картографировании.

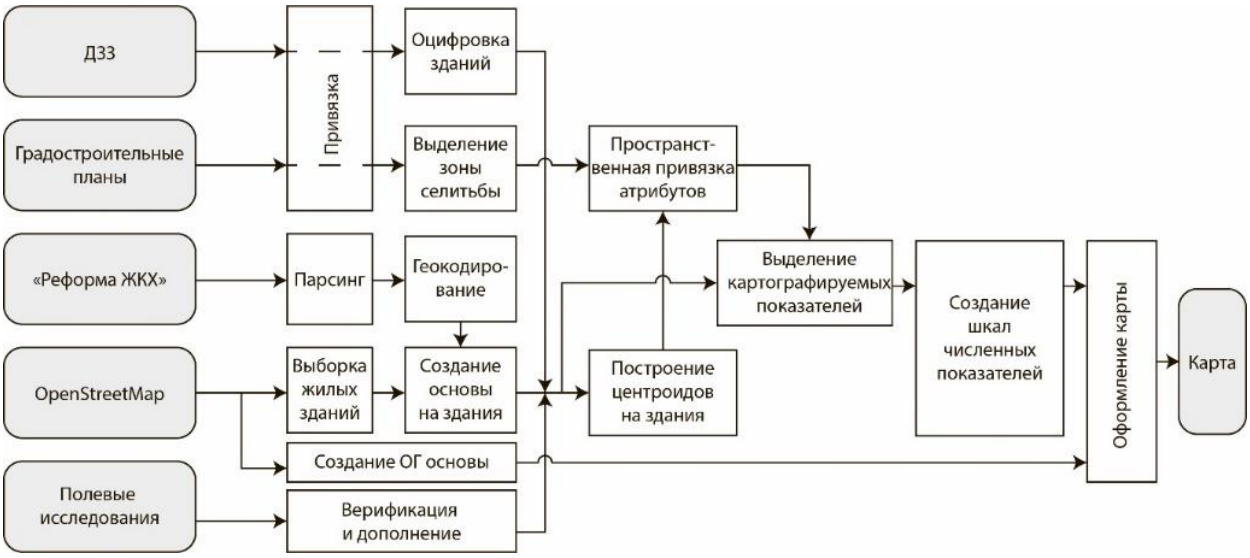


Рисунок 2 – Технологическая схема использования данных различных источников при картографировании

Важным этапом при изучении шахтерских моногородов стало проведение полевых выездов в оба изучаемых моногорода. Экспедиции преследовали две основных цели:

- получение новой, недостающей информации о состоянии жилищного фонда городов;
- проведение верификации имеющихся данных.

Верификация необходима потому, что источники данных, используемые в работе, часто являются не новыми. Таким образом, на основе полевых работ можно провести сравнение, насколько информация, используемая в рамках методики картографирования, достоверно показывает реальную структуру шахтерских моногородов.

В ходе исследования городов Кировск и Кимовск были изучены как центральные части города, так и удаленные микрорайоны (25-й км и Новый соответственно). Проводилось наблюдение состояния квартир по оконным проемам: в полевых записях на схемах отмечались пустующие квартиры. В удаленных микрорайонах городов Кимовск и Кировск таким же образом были изучены все имеющиеся жилые здания, так как их количество было невелико.

Результаты

По описанной методике было составлено по две карты на территорию Кимовска и Кировска. Тематика первой карты сфокусирована на современной структуре жилищного фонда населенного пункта (рисунок 3). На ней изображены жилая площадь на душу населения (картограмма по кварталам городской застройки), этажность городских жилых зданий (пунсоны с цветовой графической переменной), удаленность от центра города (послойной окраской изо-

линий). Данная карта позволяет оценить современное состояние жилищного фонда.

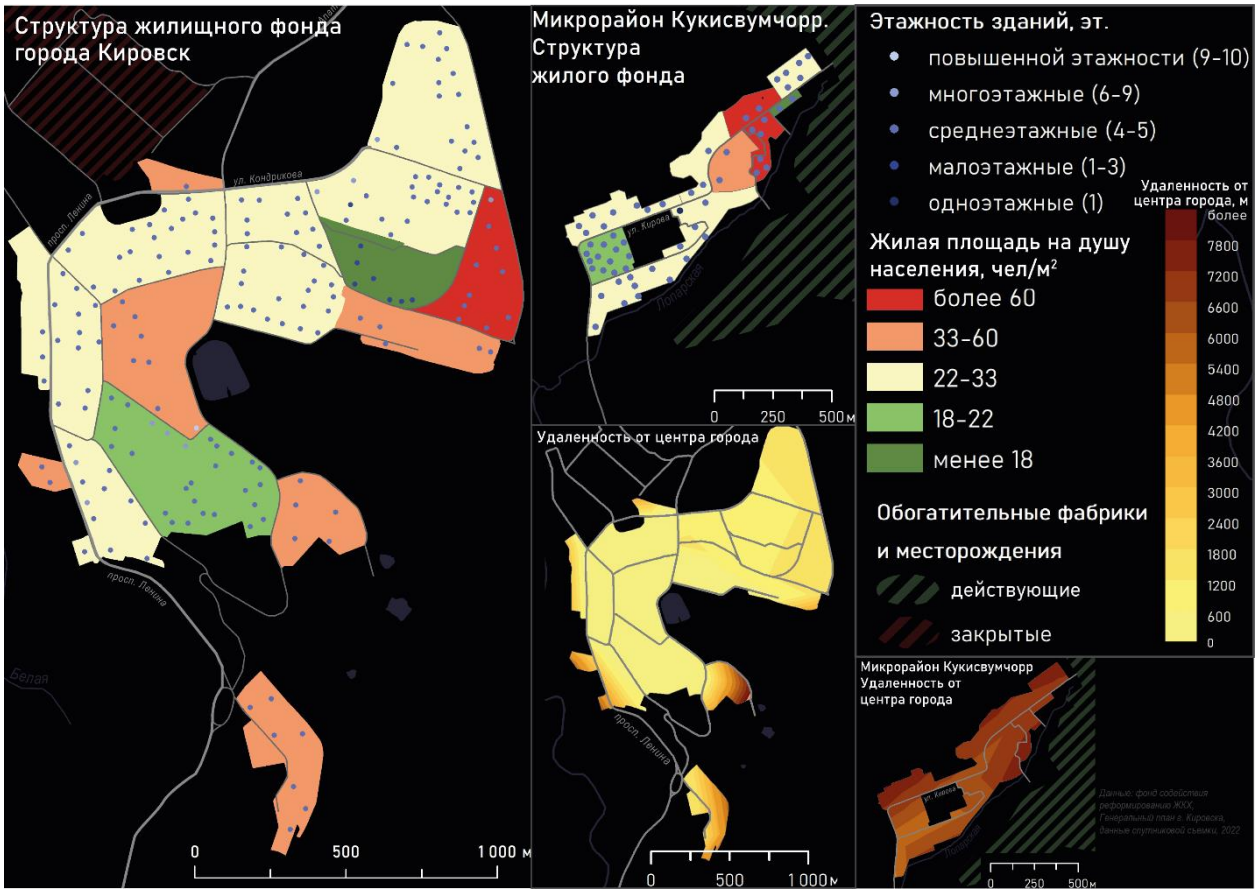


Рисунок 3 – Карта структуры жилищного фонда города Кировск

Тематика второй карты иллюстрирует изменения, произошедшие в жилой зоне за определенное время (рисунок 4). На ней изображены возраст жилых зданий (пунсоны с цветовой графической переменной), изменения жилой зоны (ареалы различного цвета в зависимости от характера динамики: строительство, снос, стагнация), снесенный и аварийный жилищный фонд (пунсоны с цветовой графической переменной). Данные карты не показывают современное состояние, но позволяют оценить темпы строительства и сноса за ближайшие 20–50 лет.

Статистические данные на город Кировск отличались своей полнотой: город практически полностью застроен многоквартирными домами, поэтому статистические данные были получены для большей части зданий (93% от всех жилых домов в городе). Полнота статистической информации нивелировалась бедностью разновременных данных дистанционного зондирования: существенных изменений в жилищном фонде по ним не было отмечено.

При картографировании Кимовска существовала проблема отсутствия данных на зону индивидуальной жилищной застройки, которая была частично решена проведенным полевым исследованием города. Второй особенностью карт на Кимовск стала более точная карта ареалов жилой зоны, а также времени сноса жилых зданий вследствие наличия архивных данных дистанционного зондирования разведывательных спутников 60–70-х гг. XX в.

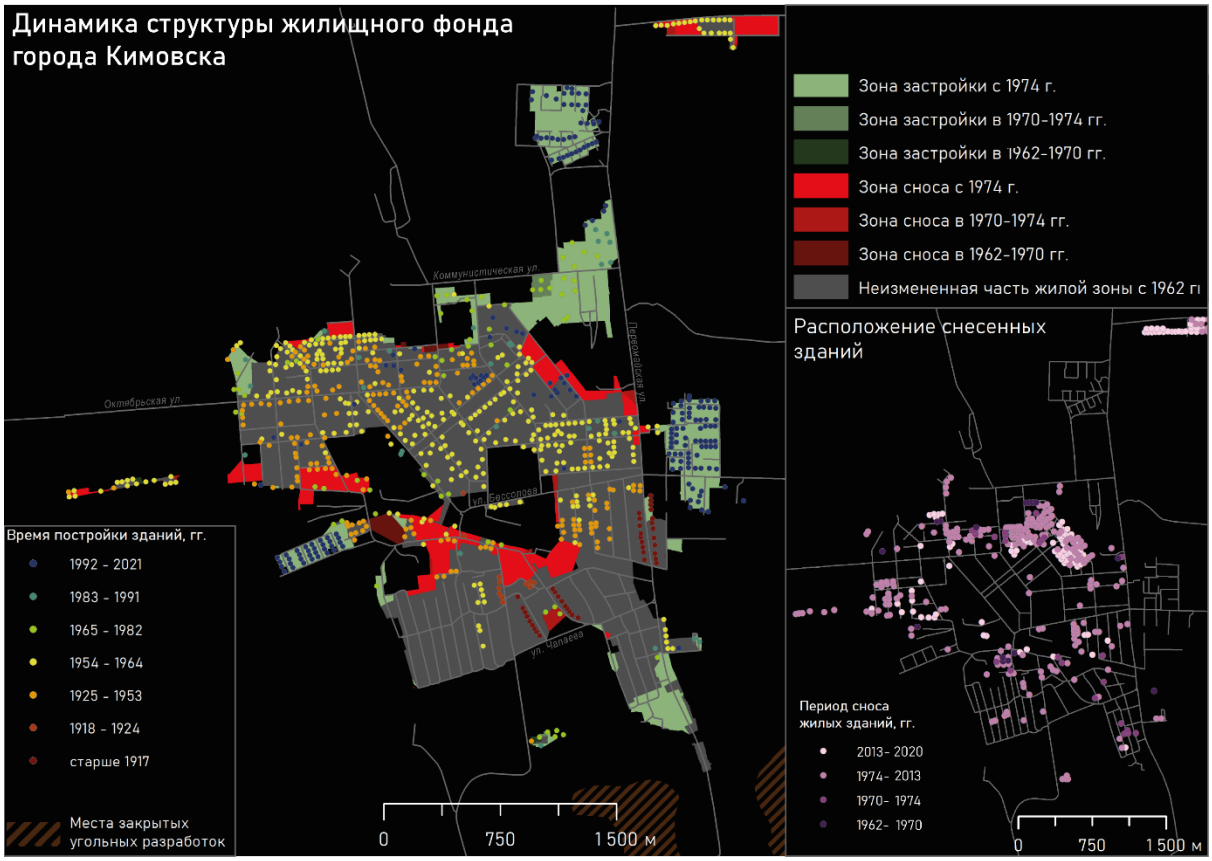


Рисунок 4 – Карта динамики структуры жилищного фонда города Кимовск

Обсуждение

В Кимовске имеется четкая диверсификация типов городской застройки. Центр города, построенный в соответствии с генеральным планом начала 50-х гг. XX в., представлен кирпичной двух-трехэтажной застройкой. На севере города расположен микрорайон позднесоветской среднеэтажной панельной застройки. Южную и восточную часть города занимает индивидуальная жилищная застройка. К Кимовску также относятся поселки, расположенные удаленно от основного городского массива. Эти поселки были расположены непосредственно при шахтах, поэтому в современное время, в условиях закрытых рудников, у них нет перспектив для дальнейшего развития. В некоторых поселках весь жилищный фонд находится в аварийном состоянии, и производится его расселение. Анализируя экономико-географическое положение Кимовска, стоит отметить его хорошую транспортную доступность и расположение на равнинной местности, на которой нет лимитирующих факторов для экстенсивного роста городской территории.

В Кимовске наблюдается особый рисунок городского сжатия: кварталы сносятся вдоль единого кольца. Данная особенность хорошо проиллюстрирована на составленной карте расположения снесенных зданий (рисунок 5).

Строительство жилых зданий преобладает на территориях, свободных от городской застройки. Уплотнительная застройка в центре была выявлена в ходе полевых исследований. Удаленные микрорайоны Кимовска, расположенные в непосредственной близости бывших рудников, за последние 10–12 лет практически полностью потеряли население. Происходит отток населения не только из удаленных частей города, но и из периферии центра; «стягивание» населения происходит вокруг одного

«ядра». В аварийном и снесенном состоянии находятся здания в районах среднеэтажных домов 1950-1960-х гг.

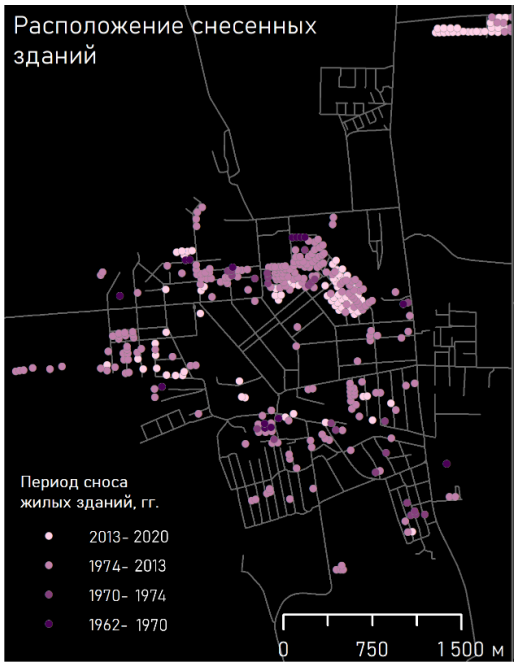


Рисунок 5 – Карта расположения снесенных зданий города Кимовск

Центральная часть города Кировск расположена в горной долине реки Белой, поэтому застройка компактно размещена на левом берегу реки с подъемом в сторону горы Айкуайвенчорр. В населенном пункте можно выделить улицу (проспект Ленина), которая выполняет «каркасную» роль для дорожной сети. Микрорайон 25-й км (Кукисвумчорр) расположен в узкой горной долине, что определило размещение жилой застройки вдоль оси долины реки Лопарской. Неблагоприятные природные условия для хозяйства практически полностью исключило возможность возникновения индивидуальной жилищной застройки на территории города.

В Кировске подавляющее число зданий жилищного фонда – многоквартирные. Это объясняет невозможность прослеживания динамики структуры жилищного фонда по снимкам: в городе было снесено всего несколько зданий (пять штук), возведено – одно. При этом городское население за 30 лет заметно сократилось. Полевое исследование населенного пункта позволило оценить долю пустующих квартир в домах, а значит и пространственную структуру городского сжатия. В Кировске наблюдается резкое опустение жилых зданий в районах, близких к шахтам, в том числе разрабатываемым. Население концентрируется в историческом центре, который не имеет единого ядра и вытянут вдоль основной дорожной магистрали. Отдаленный микрорайон города, Кукисвумчорр, в отличие от микрорайонов Кимовска, не утратил населения: причиной этому является функционирование Кировского объединенного рудника. В случае Кировска можно говорить об «очаговом» характере городского сжатия. В населенном пункте не происходит экстенсивных изменений территорий застройки. Единственное новое жилое здание в XXI веке было построено в центре Кировска, что может говорить о существовании тенденций к уплотнению структуры застройки центра.

По результатам полевого исследования города Кировск стоит отметить, что в центральной части города опустение квартир имеет повсеместный характер. В среднем в городе пустует 5–7% от общего числа квартир в зданиях, что сравнимо с ситуацией в Кимовске. Однако стоит отметить, что доля пустующего жилищного фонда увеличивается при движении от осевой дорожной магистрали города (3–7% квартир не заселены на центральной улице, 10–15% в отдаленных районах). По картодиаграмме на основе полевых данных можно увидеть распределение явления по кварталам (рисунок 6).

Микрорайон 25-й км испытывает особенно серьезные демографические проблемы. Доля пустующих площадей в зданиях составляет 9,8%, что превышает показатель основной части города на 3%. В дан-

ном районе присутствуют заброшенные жилые здания. В ходе полевых наблюдений было также выяснено, что наиболее подвергнувшаяся явлению городского сжатия часть микрорайона расположена на значительном удалении от городского центра (6–7 км).

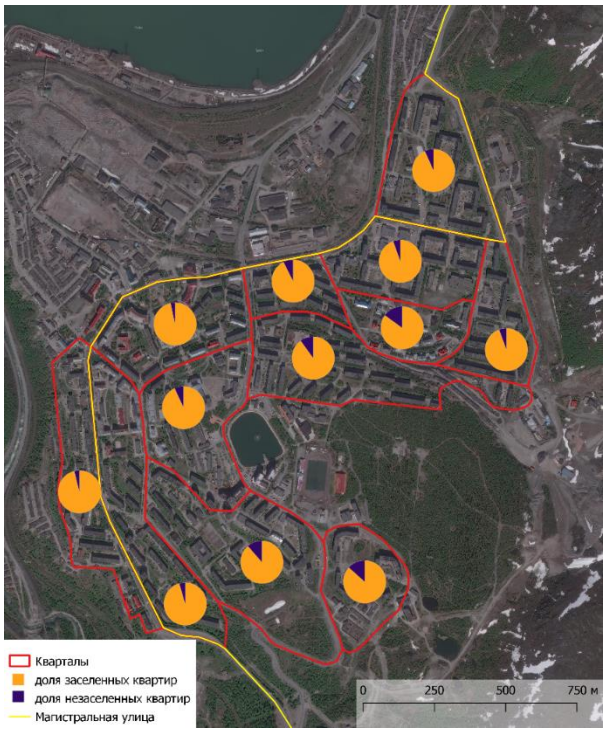


Рисунок 6 – Доля заселенности жилищного фонда по кварталам центральной части города Кировск

Выводы

Составленные картографические материалы показали различия в демографических явлениях в двух городах: заметна существенная разница в площади зоны индивидуального жилого строительства (ИЖС), зоны сноса, и пр. В Кировске, расположенном в горной долине, практически отсутствуют как расширения жилой зоны, так и сноса жилых зданий. Использование данных дистанционного зондирования не показывает динамику структуры жилищного фонда, поэтому первичную роль для ее изучения играют статистические данные и данные полевых наблюдений. В Кимовске, расположенном на равнинной местности, происходят активные изменения площади жилой застройки и количества жилых зданий. Изучение динамики структуры жилищного фонда проводится с помощью разновременных снимков, при этом статистические данные не показывают структуру жилищного фонда.

Общей особенностью структуры жилищного фонда шахтерских моногородов является городское сжатие территорий вокруг «ядер» урбанизации и смещение этих «ядер» от мест разработок полезных ископаемых к центрам городов, в которых сосредоточена инфраструктура.

Список литературы

Распоряжение Правительства РФ от 29.07.2014 № 1398-р «О перечне монопрофильных муниципальных образований Российской Федерации (моногородов) (с изменениями на 21 января 2020 года)» [Электронный ресурс] URL: http://docs.cntd.ru/document/420210942 (Дата обращения 31.10.2022).

Распоряжение Правительства РФ от 08.08.2019 № 1762-р «Изменения, которые вносятся в перечень монопрофильных муниципальных образований Российской Федерации (моногородов) [Электронный ресурс] URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201908150008?index=1&rangeSize=1 (дата обращения 31.10.2022).

СП 42.13330.2016. Планировка и застройка городских и сельских поселений // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/456054209 (дата обращения 31.10.2022).

Терминологический словарь по строительству на 12 языках (ВНИИС Госстроя СССР) [Электронный ресурс] URL: https://rags.ru/stroyka/text/50995/#i463556 (дата обращения 31.10.2022).

Constantinescu I. P. Shrinking Cities in Romania: Former Mining Cities in Valea Jiului // Built Environment. – 2012. – №2: Vol. 38 – pp. 214–228.

Großman K., Bontje M., Haase A. Shrinking cities: Notes for the further research agenda // Cities. – 2013. – Vol. 35. – pp. 221–225.

Gunko M., Batunova E., Medvedev A. Rethinking urban form in a shrinking Arctic city // Espace populations sociétés. – 2021. [Электронный ресурс] URL: https://journals.openedition.org/eps/10630 (дата обращения 31.10.2022).

Hollander J., Nemeth J. The bounds of smart decline: a foundational theory for planning shrinking cities // Housing Policy Debate. – 2011. – No3: Vol. 21. – pp. 349–367.

Kantor-Pietraga I. Does One Decade of Urban Policy for the Shrinking City Make Visible Progress in Urban Re-Urbanization? A Case Study of Bytom, Poland // Sustainability. – 2021. – №13, Vol. 4408. – pp. 1–17.

Martinez-Fernandez C., Audirac I., Fol S., Cunningham-Sabot E. Shrinking Cities: Urban Challenges of Globalization // International Journal of Urban and Regional Research. – 2012. – №36 : Vol. 2. – pp. 213–225.

Lüscher P., Weibel R. Exploiting empirical knowledge for automatic delineation of city centres from large-scale topographic databases // Computers, Environment and Urban Systems. – 2013. – Vol. 37 – pp. 18–34.

Oswalt P., Renniets T., Atlas of Shrinking Cities. // Ostfildern: Hatje Cantz Publishers. – 2006. – p. 736.

Przemiany przestrzenne oraz społeczne Bytomia i jego centrum / I. Kantor-Pietraga, R. Machowski (eds.) // Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi. – 2012. – p. 161.

Schilling J., Logan J. Greening the Rust Belt: A Green Infrastructure Model for Right Sizing America's Shrinking Cities // Journal of the American Planning Association. – 2008. – Vol. 74(4). – pp. 451–466.

Zhu J., Sun Y. Building an Urban Spatial Structure from Urban Land Use Data: An Example Using Automated Recognition of the City Centre // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2017. – Vol. 6(4). – pp. 122.

Сведения об авторах

Петр Алексеевич Барышкин – студент 1 курса магистратуры кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Наталья Анатольевна Алексеенко – доцент кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук.

Методика генерализации при построении графа железных дорог России на основе данных OpenStreetMap

Белан П.М., Прохорова Е.А., Семин В.Н.

В данной работе предложены алгоритмы построения и генерализации графа железных дорог на основе данных OpenStreetMap, определены уровни детализации железнодорожной сети Российской Федерации, характеризующие иерархию транспортной сети. Произведено выделение основных структурных компонентов железнодорожной сети, упрощение каждого компонента с помощью алгоритма, учитывающего структурные особенности. На основе этих исследований разработана методика генерализации железнодорожной сети с учетом геометрической, топологической и семантической информации. Суть данной методики заключается в отборе элементов транспортной сети с использованием упрощенной топологической модели (графа). Дальнейшее упрощение линий предполагается производить известными алгоритмами. Эффективность разработанной методики была проверена на железнодорожной сети Северо-Западного федерального округа, была произведена оценка генерализации как топологической модели, так и железнодорожной сети в целом.

Ключевые слова: граф железных дорог, генерализация железнодорожной сети, OpenStreetMap, отбор железных дорог

Generalization technique for constructing a Russian railway graph based on OpenStreetMap data

Belan P.M., Prokhorova E.A., Semin V.N.

In this paper, algorithms for construction and generalization of a railway graph based on OpenStreetMap data are proposed, as well as the levels of detail for the Russian railway network is determined, which characterize the transport network hierarchy. Main structural components of the railway network is identified, then each component is simplified using an algorithm that considers the structural features. Based on these studies, we develop a technique for generalizing the railway network, considering geometric, topological and semantic information. This technique consists of selecting elements of the transport network using a simplified topological model (a graph). Further simplification of the lines is supposed to be carried out by known algorithms. The effectiveness of the developed technique was tested on the railway network of the Northwestern Federal District, as well as the generalization of both the topological model and the railway network as a whole was assessed.

Keywords: railway graph, railway network generalization, OpenStreetMap, railway selection.

Введение

Транспортная сеть является одним из основных элементов карты, поскольку она отражает степень освоенности картографируемой территории, дает представление об экономических связях между изучаемыми районами.

Для решения многих транспортных и логистических задач транспортную сеть представляют в виде графа. Например, при моделировании задач рациональной маршрутизации, выбора оптимального пути [Жилякова, Кузнецов, 2021], в ситуационном

анализе [Дышленко, 2018], геомаркетинговых исследованиях. Модель графа удобна тем, что его ребрам можно задавать сразу несколько характеристик (расстояние, время, затраты на перевозку и пр.) и определять кратчайший, самый оптимальный по времени и/или затратам путь. На основе графов строятся сетевые модели, которые применяются при анализе транспортных сетей [Шлапак, Лонский, 2018].

В работах по генерализации железнодорожной сети последних лет рассматриваются, как правило такие аспекты генерализации транспортных сетей как:

- Слияние территориально-близких транспортных путей [Самсонов, Прохорова, 2019; Czioska et al., 2015];
- Представление транспортной сети в виде графа и дальнейшее ее упрощение [Richardson, Thomson, 1996];
- Использование графа как вспомогательной модели при генерализации транспортной сети [Чибряков, 2015];
- Структурный подход к генерализации [Li et al., 2019; Savino, Touya, 2015].

В последние годы одним из наиболее популярных подходов к генерализации железнодорожной сети становится структурный подход. Его суть заключается в идентификации структурных элементов сети и разработке алгоритмов генерализации для каждого класса структур.

Разработка алгоритма генерализации графа железнодорожной сети необходима для оптимизации вычислений, связанных с решением задач на региональном и национальном уровне. Создание нескольких уровней детализации графа железнодорожной сети позволит гибко подойти к решению поставленных задач и решит проблему визуализации транспортной сети в различных картографических масштабах.

Цель исследования – разработка методики генерализации железных дорог с использованием семантической информации OpenStreetMap, топоморфологической структуры и представления транспортной сети в виде графа.

Материалы и методы

При моделировании сети железных дорог России в первую очередь необходимо решить вопрос о выборе источника данных для проектируемого графа. Данные должны соответствовать следующим требованиям: высокая детальность, которая позволит решать транспортно-логистические задачи на локальном, региональном и национальном уровнях; полнота и достоверность, которая обеспечит высокую точность решения задач; большой объем данных, необходимый для создания графа на территорию всей страны. Всем этим требованиям удовлетворяет некоммерческий веб-картографический проект OpenStreetMap.

В 2013 г. разработан подход к составлению цифровых карт железных дорог на основе данных OpenStreetMap [Rahmig, Kluge, 2013]. Оба ученых сошлись во мнении, что наиболее удачным представлением транспортной сети послужит граф железных дорог, разбитый вершинами в точках разветвления на стрелочных переводах, пересечениях и концах железнодорожных путей. Эти исследования легли в основу методики построения графа.

В качестве вершин графа были выбраны как семантически важные (станции, остановочные пункты, стрелочные переводы и др.), так и топологически важные (точки пересечения нескольких путей). Для извлечения семантической информации использовались теги OpenStreetMap вида «ключ: значение». Конкретные объекты и соответствующие им теги представлены в таблице 1.

Алгоритм построения графа был реализован на языке Python с использованием программных модулей Networkx, Osmnx, Osmium (рисунок 1).

Таблица 1 – Описание точечных объектов OpenStreetMap – потенциальных вершин графа [Электронная энциклопедия OpenStreetMap, 2021]

Ключ	Значение	Описание
railway	*halt*	*Остановочные (раздельные) пункты железной дороги, менее значимые, чем станция (например, полустанок, разъезд).*
public_transport	*platform*	*Платформы, перроны.*
railway	*station*	*Железнодорожные станции, выполняющие пассажирские и/или грузовые операции.*
railway	*buffer_stop*	*Преграды в конце железнодорожного пути.*
railway	*switch*	*Железнодорожные стрелки*
railway	*turntable*	*Поворотные круги. Обычно используются в депо, чтобы разворачивать вагоны и локомотивы*

Прежде чем переходить к разработке методики генерализации графа железнодорожной сети, необходимо определиться с набором уровней детализации, который потребуется при мультимасштабном картографировании (см. таблицу 2).

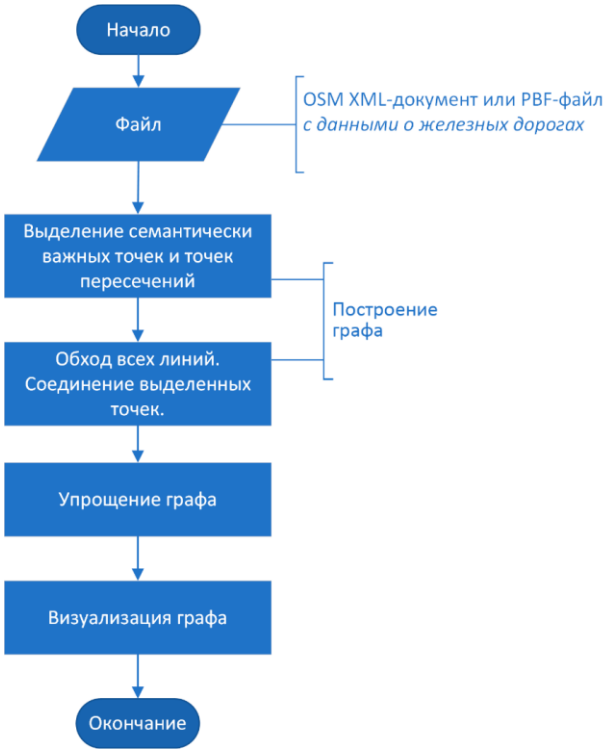


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма построения графа

При работе с данными OSM предложено разделить всю железнодорожную инфраструктуру на структурные элементы [Savino, Touya, 2015]. Наиболее важными и характерными структурами являются веерные разветвления (*fans*) и параллельно идущие станционные пути (*packs*), для которых были разработаны отдельные алгоритмы генерализации. Аналогичным образом в данной работе были разработаны алгоритмы генерализации для этих структурных компонентов, которые выделялись на основе атрибутивной информации: веерным разветвлениям, как правило, присваивается тег «*service: spur*», реже «*service: yard*»; параллельно идущим станционным путям – «*service: siding*» или «*service: yard*». С помощью отдельного алгоритма таким же образом упрощаются главные железнодорожные пути (не имеют тега «*service*»), которые соединяют станции и остановочные пункты.

В работе предлагается алгоритм автоматизированного способа генерализации главных железнодорожных путей, разработанный на основе алгоритма стягивания ребер, который описан в статье [Самсонов и др., 2014]. Суть данного подхода состоит в анализе как непосредственных соседей вершины А, так и соседей второго порядка. Схему работы разработанного алгоритма можно представить следующим образом:

1. Обход всех вершин графа, относящихся к главным железнодорожным путям;
2. Для очередной вершины А определяется ребро с минимальной ценой стягивания и ID соседа, к которому ведет это ребро;

Таблица 2 – Уровни детализации графа железнодорожной сети

№	Диапазон масштабов	Уровень детализации	Вид представления транспортной сети	Минимально отображаемая структура в рамках железнодорожной инфраструктуры	Территориальный охват решаемых задач
1	*1:25 000 и крупнее*	*Все объекты сети железных дорог отображаются с максимальной подробностью*	*Геометрическая модель транспортной сети с использованием данных OpenStreetMap*	*Структура станции, остановочного пункта, развязочного узла, разъезда.*	*Локальный*
2	*1: 25 000 – 1: 250 000*	*Отбор и слияние параллельно идущих путей в зоне их сгущения в районе станций, остановочных пунктов, развязочных узлов*	*Переход к топологической модели (графу) железных дорог. Отбор транспортных путей на основе графа*	*Структура железнодорожной сети крупных городов и их пригородов*	*Локально-региональный*
3	*1:250 000 – 1: 2 000 000*	*В качестве вершин графа использовать только остановочные пункты и станции. Сохранение только главных путей, связывающих станции и остановочные пункты*	*Отбор транспортных путей на основе упрощенного графа*	*Структура железнодорожной сети в пределах одного субъекта РФ*	*Региональный*
4	*1: 2 000 000 – 1: 8 000 000*	*Использование в качестве вершин графа только станций и путей, их соединяющих*	*Отбор транспортных путей на основе упрощенного графа*	*Структура филиала РЖД (Октябрьская, Северная ж. д. и др.)*	*Региональный*
5	*1: 8 000 000 – 1: 30 000 000*	*Использование в качестве вершин графа только крупных станций и путей, их соединяющих*	*Отбор транспортных путей на основе упрощенного графа*	*Структура железных дорог России*	*Национальный*

3. Создание подграфа из соседей 2-го порядка вершины A;
4. Определение минимального расстояния от точки A до ближайшей вершины из подграфа и ее ID. Создание мнимого ребра (ребро, которое создается между вершиной и ее соседом 2-го порядка и на следующем шаге стягивается);
5. Если цена стягивания реального ребра меньше цены стягивания мнимого ребра и меньше порогового значения (параметр *a* – для реальных ребер, параметр *b* – для мнимых), то следует стянуть реальное ребро (и наоборот);

6. Повторение шагов 1–5 до тех пор, пока граф не перестанет изменяться (рисунок 2).

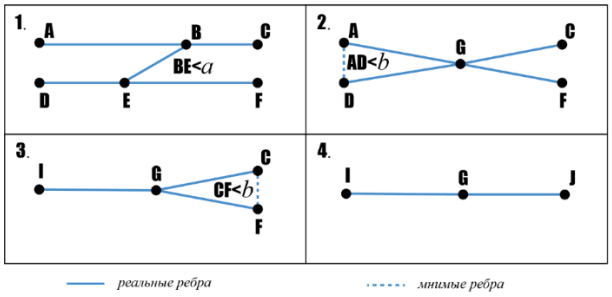


Рисунок 2 – Схема работы алгоритма генерализации главных железнодорожных путей

При использовании этого алгоритма возникает проблема выбора пороговых значений для длин реальных (далее – параметр *a*) и мнимых (далее – параметр *b*) ребер и их отношения. Мнимые ребра отвечают, главным образом, за объединение параллельно идущих линейных объектов – *поперечную составляющую генерализации,* а реальные ребра за упрощение линий – *продольную составляющую генерализации*. Поэтому соотношение пороговых значений для различных типов ребер характеризует соотношение поперечной и продольной составляющей генерализации линий.

Алгоритмы генерализации характерных структурных элементов были разработаны на основе анализа количества соседей и ближайшего соседства. Например, для веерных разветвлений характерно скопление вершин, у которых есть всего лишь один сосед. Таким образом, для обработки данных структур была выбрана следующая последовательность действий:

1. Обход всех вершин графа, относящихся к служебным путям (имеют тег «service»);
2. Для очередной вершины A оценивается количество соседей;
3. Если вершина имеет единственного соседа, то она исключается из графа. Координаты точки и атрибутивная информация записывается в отдельный список;
4. Используя, координаты исключенной точки вычисляется ID ближайшей точки графа;
5. Исключенная точка возвращается в граф со всей сохраненной информацией;
6. Если найденная точка имеет единственного соседа и расстояние от исходной вершины меньше порогового значения (параметр поперечной генерализации *b*), то точка при ребре имеющим меньшую длину;
7. Упрощение графа. Удаление вершин, не хранящих важную атрибутивную информацию, имеющих только двух соседей.

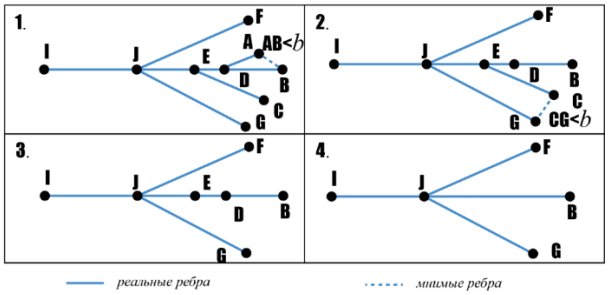


Рисунок 3 – Схема работы алгоритма генерализации веерных разветвлений

Результат работы алгоритма представлен на схеме (рисунок 3). Он имеет в качестве входного только параметр поперечной генерализации, поскольку главная его задача – это разреживание плотного веерного разветвления. Продольная генерализация наиболее коротких ответвлений будет производиться после работы всех трех алгоритмов.

Алгоритм генерализации параллельно идущих станционных путей был разработан на основе анализа количества соседей вершины, а также выделения четырехугольников и треугольников с последующим их сжатием в одно ребро. Суть его заключалась в выделении соседних ребер, ограниченных двумя стрелочными переводами. Алгоритм

можно представить следующим образом:

1. Обход всех вершин графа, относящихся к служебным путям (имеют тег «service»);
2. Для очередной вершины A оценивается количество соседей;
3. Если A имеет более двух соседей, то среди всех ребер инцидентных вершине A выбирается ребро с максимальной длиной. Конец найденного ребра – вершина B;
4. Среди всех ребер инцидентных вершине A выбирается ребро с минимальной длиной. Конец ребра – вершина C;
5. Для вершины C повторяется шаг 3;
6. Если D на другом конце найденного ребра совпадает с B и ребро AC имеет длину меньше $c = \sqrt{a^2 + b^2}$ (где a и b – параметры продольной и поперечной генерализации соответственно), то ребро BC стягивается;
7. Если существует ребро BD (D – сосед вершины B) и его длина меньше $c = \sqrt{a^2 + b^2}$, то оно стягивается. Аналогично, ребро AC. В случае, когда C и D – вершины главных железнодорожных путей, ребро AB удаляется из графа;
8. Упрощение графа: удаление вершин с двумя соседями, не хранящих важную атрибутивную информацию.

Процесс работы этого алгоритма представлен на схеме (рисунок 4). Результат работы этого алгоритма зависит от значения параметра c, который можно представить как гипотенузу прямоугольного треугольника, образованного катетами a и b, где a и b – значения параметров продольной и поперечной генерализации соответственно. Выбор такого порогового значения обусловлен тем, что ответвления от главных железнодорожных путей идут в направлении отличном от продольного и поперечного.

Стоит отметить, что все три разработанных алгоритма являются итерационными: итерации продолжаются до тех пор, пока граф не перестанет изменяться. Как было сказано выше, после работы всех трех указанных алгоритмов, совершается итерация по всем вершинам графа для устранения артефактов в виде изолированных вершин и удаления веерных ответвлений длиной меньше параметра a. При генерализации (стягивании ребер) учитывались семантические характеристики вершины. Например, если точка соответствует станции или остановочному пункту, то ее положение не изменяется. Роль семантической информации в данной методике генерализации достаточно велика, поскольку анализ семантических особенностей объектов производится на всех этапах работы с графом.

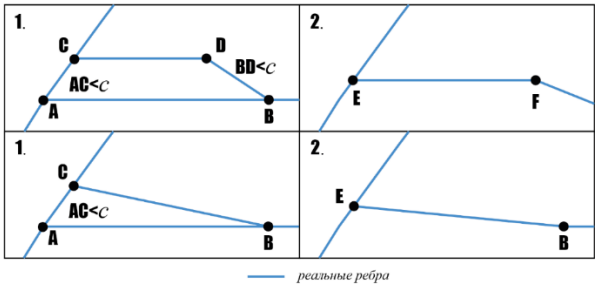


Рисунок 4 – Схема работы алгоритма генерализации параллельно идущих станционных путей (рисунок автора)

Следующий этап после упрощения графа железных дорог – переход к генерализации самой транспортной сети. Стоит отметить, что на основе графа производится только отбор железнодорожных путей, а упрощение линий в соответствии с требованиями масштаба и детализации производится с использованием известных алгоритмов [Douglas, Peucker, 1973; Li, Openshaw, 1992; Wang, Müller, 1998; Visvalingam, Whyatt, 1993]. Транспортная сеть в данном случае должна быть представлена неупрощенным графом, в котором хранятся все точки (*nodes*), содержащиеся в исходных данных OSM и ребра, соединяющие эти точки.

Алгоритм отбора элементов железнодо-

рожной сети представлен следующим образом:

1. Обход всех ребер графа железных дорог;
2. Извлечение ID вершин очередного ребра AB;
3. Если A (или B) не принадлежит транспортной сети, то стоит взять ID ближайшей вершины транспортной сети;
4. Построение кратчайшего пути между A и B по транспортной сети;
5. Добавление вершин и ребер этого пути в результирующую генерализованную сеть;
6. Упрощение линий с помощью одного из известных алгоритмов.

Результаты

Результаты работы трех алгоритмов генерализации на примере железнодорожной сети Калининградской области можно увидеть на схеме (рисунок 5). Генерализация производилась с параметрами a = 250 м и b = 100 м.

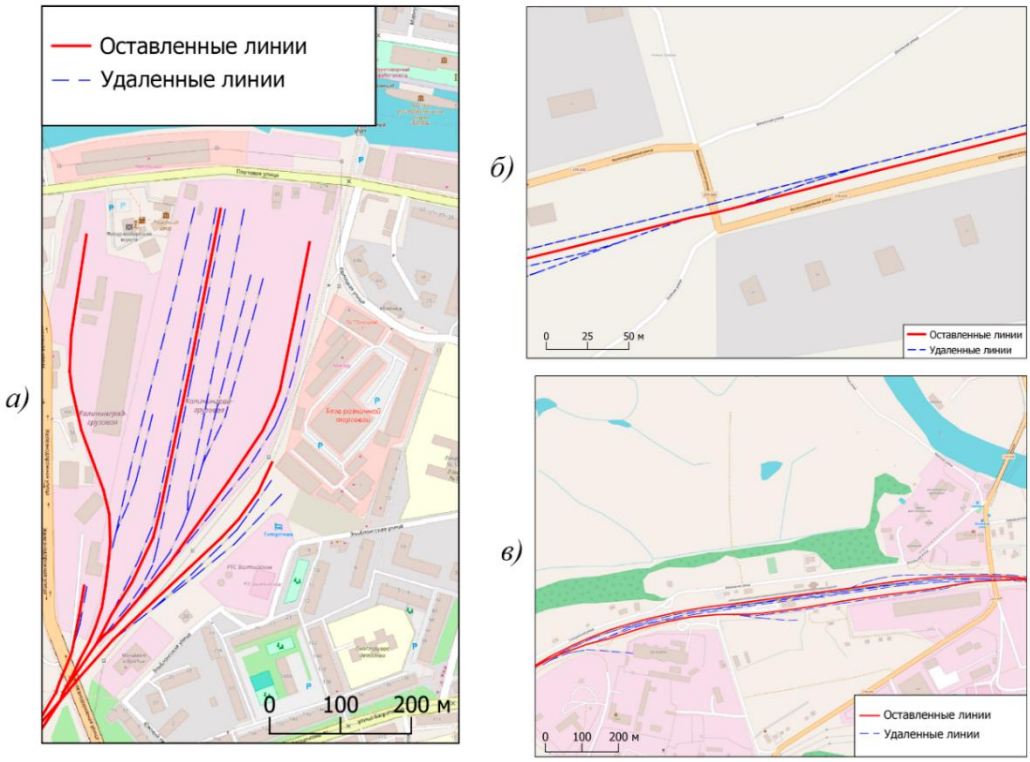


Рисунок 5 – Схема результатов работы алгоритма генерализации: *а)* веерных разветвлений *б)* главных железнодорожных путей *в)* параллельно идущих станционных путей.

После успешной проверки работы алгоритмов на примере железнодорожной сети Калининградской области, было принято решение отобразить железнодорожную сеть всего Северо-Западного федерального округа (далее – СЗФО).

Для генерализации графа в соответствии с уровнями детализации (таблица 2) были выбраны следующие средние масштабы для данных уровней: 1:100 000, 1:1 000 000, 1:5 000 000, 1:15 000 000. Для отображения исходной железнодорожной сети был использован масштаб 1:15 000. После ряда экспериментов параметры продольной и поперечной генерализации были определены как расстояния в масштабе 1 см и 1 мм соответственно. После генерализации железнодорожной сети была произведена ее оценка.

Производилась проверка качества генерализации как топологической модели

(графа), так и железнодорожной сети в целом. Для оценки упрощения графа был использован β-индекс Канского [Kansky, 1963], а для проверки генерализации был использован показатель относительной графической нагрузки линейных объектов. β-индекс Канского имеет достаточно простое математическое описание и равен отношению числа ребер графа к числу вершин. Данный индекс был рассчитан (таблица 3) для графа железных дорог Северо-Западного федерального округа на различных уровнях детализации.

Таблица 3 – Вычисленный β-индекс Канского для графа железных дорог СЗФО на различных уровнях детализации

Средний масштаб уровня детализации	Количество ребер	Количество вершин	β-индекс Канского
1: 15 000 (исходные данные)	*42 659*	*35 640*	*1,20*
1: 100 000	*6 971*	*5 952*	*1,17*
1: 1 000 000	*961*	*790*	*1,22*
1: 5 000 000	*600*	*523*	*1,15*
1: 15 000 000	*322*	*235*	*1,37*

Сложно выявить четкую зависимость индекса Канского от уровня детализации, но некоторые изменения индекса поддаются объяснениям. Например, при переходе к уровню детализации, в котором удаляются все древовидные веерные разветвления и станционные пути, заметен скачок индекса вследствие увеличения доли циклов в графе. Таким же образом объясняется скачок показателя на наименее подробном уровне детализации, поскольку разработанный алгоритм достаточно «бережно» относится к крупным циклам и на мелких масштабах удаляет слишком короткие ответвления. Разработанная методика в целом сохраняет топоморфологическую структуру сети, исключая наиболее мелкие масштабы, в которых происходит увеличение доли циклов в сети.

Выводы

Таким образом, в ходе исследования удалось реализовать гибкий подход к генерализации железнодорожной сети с учетом геометрической, топологической и семантической информации на языке программирования Python. Особое внимание уделялось анализу семантических характеристик объектов. Они учитывались при добавлении вершин в граф, стягивании ребер, выделении структурных элементов железнодорожной сети. Разработанная методика сохраняет топоморфологическую структуру сети и обеспечивает оптимальную графическую нагрузку на картографическое изображение на различных уровнях детализации, поэтому предложенные алгоритмы могут быть использованы при составлении мультимасштабных карт железных дорог.

Список литературы

Дышленко С. Г. Ситуационный анализ в транспортной сети // Труды НИИАС. 2018. – Вып. 1(5)(2), с. 26–33.

Жилякова Л. Ю., Кузнецов Н. А. Графовые методы решения задачи об оптимальном назначении локомотивов на линейном участке железной дороги - без ограничений и с ограничениями // Автоматика и телемеханика. – 2021. – с. 45–67.

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. – Вып. № 3(885). – с. 29–36.

Самсонов Т. Е., Прохорова Е. А. Генерализация транспортных сетей при мультимасшиабном картографировании // Известия РАН. Серия географическая. – 2019. – Вып. 1 – с. 107–117.

Чибряков Я. Ю. Развитие картографического метода для исследований железнодорожной сети России: дис. канд. тех. наук: 25.00.33/ Чибряков Ярослав Юрьевич; науч. рук. Т. В. Верещака; МИИГАиК. – Москва, 2015. – 199 с.

Шлапак В. В., Лонский И. И. Транспортные сети и их исследование методами геоинформатики // Труды НИИАС. – 2018. – Вып. 1(5)(2), с. 54–61.

Czioska P., Thiemann F., Sester M., Giese R., Vogt H., Ein Algorithmus zur Erstellung eines vereinfachten Bahnnetzes durch Generalisierung // Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation. – 2015. – № 1 (2015). – pp. 95–104.

Douglas D. H, Peucker T. K. Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature // The Canadian Cartographer. – 1973. – No 10(2). – pp. 112–122.

Kansky K. J. Structure of transportation networks: relationships between network geometry and regional characteristics // Chicago University. Department of geography. Research Paper. – 1963. – No 84. – 156 p.

Li C., Liu X., Wu W., Wu P. An automated method for the selection of complex railway lines that accounts for multiple feature constraints // Transactions in GIS. – 2019. – No 6(23). – pp. 1296–1316.

Li Z., Openshaw S. Algorithms for automated line generalization based on a natural principle of objective generalization // International journal of geographical information systems. – 1992. – № 5(6). – pp. 373–389.

Rahmig C., Kluge A. Digital maps for railway applications based on OpenStreetMap data // ITSC 2013 – The Hague, Netherlands: IEEE. – 2013. – pp. 1322–1327.

Richardson D., Thomson R. Integrating Thematic, Geometric, and Topological Information in the Generalization of Road Networks // Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization. – 1996. – No 1(33). – pp. 75–83.

Savino S., Touya G. Automatic Structure Detection and Generalization of Railway Networks// . International Cartographic Conference 2015 – Rio de Janeiro, Brazil: ICA.

Visvalingam M., Whyatt J. D. Line generalisation by repeated elimination of points // The Cartographic Journal. – 1993. – No 1(30). – pp. 46–51.

Wang Z., Müller J.-C. Line Generalization Based on Analysis of Shape Characteristics // Cartography and Geographic Information Systems. – 1998. – No 1(25). – pp. 3–15.

Электронная энциклопедия OpenStreetMap [электронный ресурс]. URL: https://wiki.openstreetmap.org (дата обращения: 30.09.2021).

Сведения об авторах

Платон Михайлович Белан – студент 4 курса бакалавриата кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Елена Андреевна Прохорова – доцент кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук.

Семин Владимир Николаевич – научный сотрудник кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Возможности представления на картах велоинфраструктуры города (на примере ЮЗАО г. Москвы)

Корнилов Д.А., Прохорова Е.А.

В статье показаны возможности картографирования различных показателей при исследовании существующей инфраструктуры для средств индивидуальной мобильности в пределах округов города Москвы. Обзор работ по этой теме, показывает малый опыт в изображениях велосипедной инфраструктуры на картах. Основная функция существующих карт – отображение фактического положения линейных и точечных объектов велосипедного транспорта без пространственного анализа инфраструктуры. В работе сформулированы основные требования к географической основе для создания карт развития веломобильности в мегаполисе, разработаны графические приемы изображения явлений, которые улучшают наглядность результатов исследований инфраструктуры. Составлены карты велосипедной инфраструктуры с учетом найденных возможностей визуализации. Определены направления развития картографирования велоинфраструктуры, решены проблемы поиска достоверных и актуальных источников статистических и картографических данных.

Ключевые слова: база данных, картографирование велосипедной инфраструктуры, средства индивидуальной мобильности

Possibilities of city bicycle infrastructure mapping: case study of the South-Western Administrative Okrug of Moscow)

Kornilov D.A., Prokhorova E.A.

The article shows the possibility of mapping various indicators in the study of the existing infrastructure for means of individual mobility within the districts of Moscow. A review of studies on this topic shows little experience in depicting cycling infrastructure on maps. The main function of the existing maps is to display the actual position of linear and point objects of bicycle transport without a spatial analysis of the infrastructure. The study formulates requirements for a basemap of the cycling mobility development in a metropolis. Graphic techniques for depicting phenomena have been developed that improve the visibility of infrastructure research results. Maps of the cycling infrastructure have been compiled, considering the visualization possibilities found. The directions of development of cycling infrastructure mapping are determined, the problems of finding reliable and relevant sources of statistical and cartographic data are solved.

Keywords: database, cycling infrastructure mapping, personal mobility aids

Введение

Увеличение численности велосипедистов и пользователей средств индивидуальной мобильности в Москве за последние несколько лет значительно выросли и существенно опережают темпы развития велосипедной инфраструктуры в городе. Создание велоинфраструктуры за рубежом в подобных климатических условиях (например, Хельсинки) подтверждает, что строительство необходимых объектов также, как и

обеспечение безопасности на велодорогах способствуют увеличению количества пользователей средств индивидуальной мобильности (СИМ) на улицах. Несмотря на то, что велосипеды и самокаты сейчас являются важным средством передвижения, развитие их инфраструктуры в крупных городах РФ происходит достаточно медленно. Феномен быстрых темпов развития велосипедного транспорта вызывает потребность в комплексном подходе к ее исследованию, систематизации и представлении на картах и интернет-ресурсах городов.

Дорожно-транспортная инфраструктура, в том числе и велосипедная, включает линейные объекты (велополосы и велодорожки), места стоянки велосипедов, станции технического обслуживания. Велосипедная инфраструктура тесно связана с остальными элементами городской среды. В комфортном для человека городе, сохраняющем баланс между природными и антропогенными составляющими ноосферы, развиваются прогулочные сценарии использования средств индивидуальной мобильности, а затем и транспортные – задача перемещения человека из одной точки в другую за кратчайшее время. В первый год развития самокатного движения в Москве было отмечено 140 тыс. поездок, а в 2021 году только в районе Раменки за неполный сезон подсчитано больше 150 тыс. поездок [Трушеринг, ЦОДД, 2021].

Для исследования был выбран Юго-Западный административный округ города Москвы, где большое внимание уделяется экологии и вопросу безопасности участников дорожного движения. Численность населения округа составляет 1432 человек, площадь 111,36 км^2, плотность населения – около 13 тыс. чел/км^2. Наиболее активные транспортные перемещения и развитие индивидуальной мобильности здесь наблюдаются возле крупных кампусов (общежитий МГУ, студенческих городков в Обручевском районе, районах Коньково и Теплый Стан), бизнес-центров (штаб-квартиры ПАО «Сбербанк», офисов ПАО «Газпром», ПАО «Новатек» и др.) [ЦОДД, 2021]. Велосипедная инфраструктура задействована в работе курьеров, которые выполняют доставку из торговых центров, находящихся около станций метро.

Зеленые зоны в округе играют большую роль, выполняя транзитную и рекреационную функцию в зависимости от сценариев использования СИМ. Однако основное место в системе пространств для перемещения занимает улично-дорожная сеть. Округ имеет преимущественно квартальную застройку, за исключением тех районов, где на нее оказывают влияние реки и крупные природные охранные территории (Котловка, Ясенево, Южное Бутово). Эти объекты являются примерами барьеров – природных или антропогенных ограничений, которые препятствуют существованию и проектированию единой инфраструктурной сети. К таким же объектам относят дороги без наземных переходов и автомагистрали, частные территории.

Строительство инфраструктуры предполагает ее планирование и проектирование в зависимости от мест притяжения целевых аудиторий (университеты, бизнес-центры, транспортно-пересадочные узлы, парки и наиболее популярные у велосипедистов улицы), а также уровня уже существующей инфраструктуры. При этом на всех этапах необходимо картографическое представление инфраструктуры.

Составление карт велоинфраструктуры зависит прежде всего от качества исходных данных. Единой базы велосипедной инфраструктуры для Москвы не существует, поэтому необходим сбор всех имеющихся актуальных пространственных данных. Информация о расположении велопарковок обновляется довольно часто в профильных

базах данных, на картографических вебсервисах и сайтах управляющих компаний, так как эти сооружения используются в прокате велосипедов и электросамокатов. Линейная инфраструктура в экономических отношениях не используется, поэтому информация о ней обновляется в указанных источниках реже и часто предоставляется не полностью. Между тем, именно линейная инфраструктура влияет на скорость и безопасность передвижения велосипедистов в городах. Кроме того, крайне нуждаются в таких картах *навигаторы* – программы, помогающие сделать осознанный выбор безопасного и быстрого маршрута.

Попытки картографирования велосипедных линий в городе начались сразу после создания велосипеда. В конце XIX века появились карты междугородних и внутригородских дорог для велосипедистов [National Geographic, 2022]. Из-за малой протяженности велосипедных дорог отечественный опыт их картографического представления практически отсутствует; отмечается малое количество используемых характеристик, так как велополосы и велодорожки показываются без разделения на типы, без определения их положения на или вне проезжей части дорог. В редких случаях на картах можно найти нестандартные показатели, например, плотность окончания поездок на СИМ (рисунок 1).

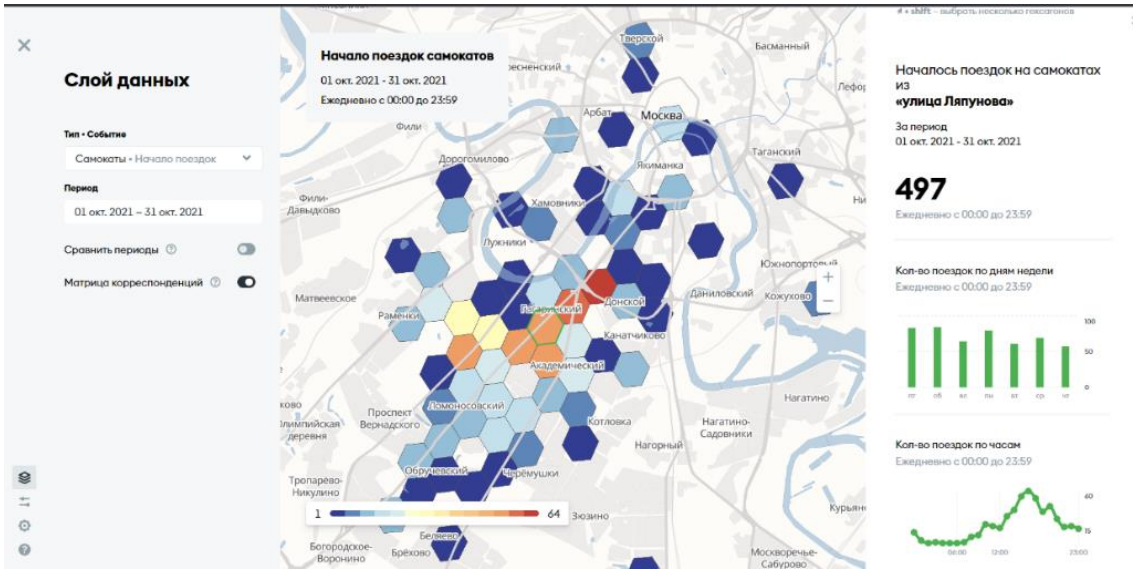


Рисунок 1 – Плотность пунктов окончания поездок если начальная точка маршрута в пункте «улица Ляпунова» [ЦОДД, 2021]

За рубежом активно используются вебпорталы для создания навигационных сервисов, карты «тепловых» следов велосипедистов, создаются карты инфраструктуры с изображением не только траекторий дорожек, но и типологии улиц по безопасности для пользователей СИМ. Иногда показываются такие характеристики как максимальная разрешенная скорость, ширина проезжей части, место улицы в скоростном каркасе города (например, карта Цинциннати для велосипедиста). На этой карте уличная сеть классифицируется по скоростному режиму, на улицах показываются велополосы, светофоры, велосипедные магазины, зоны притяжения – парки, студенческие городки, магазины (рисунок 2). На карте есть дополнительная информация об окрестностях города, карта ремонтных станций, маршрутов, отмечены высокие холмы. Отметим, что большинство карт велосипедной инфраструктуры остается инвентаризационными.

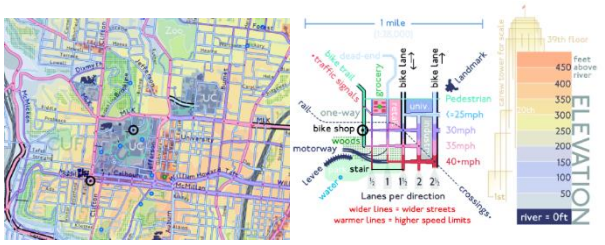


Рисунок 2 – Фрагмент и легенда карты Цинциннати для велосипедистов [Wessel, Widener, 2015]

Зарубежные исследования по этой теме используют картографические материалы в прикладных отраслях для иллюстрации определенных проблем. Во многих работах авторы ставят задачу поиска оптимальных способов изображения, представления доступности объектов для велосипедистов, водителей самокатов и пешеходов на аноморфированных картах [Lopes et al., 2021]. Есть примеры оптимизации велосипедной инфраструктуры для нужд сервисов велопроката [Aranda-Corral et al., 2021], разработки комплексных оценок доступности городов для пользователей СИМ [Bartzokas-Tsiompras et al., 2021].

Цель настоящей работы – разработка графических приемов и способов для представления на картах велоинфраструктуры Юго-Западного административного округа г. Москвы на основе изучения отечественного и зарубежного опыта картографирования велосипедной инфраструктуры.

Материалы и методы

Для создания карт велоинфраструктуры на территорию Юго-Западного административного округа г. Москвы прежде всего была подготовлена географическая основа с обязательным наличием на ней объектов, прямо или косвенно стимулирующих или лимитирующих развитие велосипедной инфраструктуры (барьеров).

Улично-дорожная сеть при этом рассматривается и как элемент географической основы, и как элемент основного содержания карт (рисунок 3). Водотоки и водоемы являются естественными барьерами для перемещения на любом виде транспорта (кроме водного), поэтому на географической основе обязательны объекты гидрографии. Показ растительности на картах обязателен при необходимости учета рекреационных зон. Такие территории пригодны для сооружения инфраструктуры для СИМ, что способствует уменьшению перепробега пользователей транспорта. В то же время, грамотно спроектированные объекты будут незначительно влиять на рекреационный потенциал зеленых зон и безопасность пешеходов.

Существующие базы данных велоинфраструктуры города, в основном, сконцентрированы на портале открытых данных правительства Москвы [Правительство Москвы]. Здесь представлены пространственные данные о велосипедных дорожках и парковках и станции проката велосипедов. Данные часто обновляются, но информация неполная. В этой базе данных не учитываются временные велополосы, велопарковки коммерческих организаций, хотя они занимают значительную часть всей велоинфраструктуры Москвы. Обновление базы данных затруднено: при отправке ведомством обновлений или дополнений, портал часто эти правки не отображает. Коммерческие проекты и базы, скорее всего, не имеют доступа к точным пространственным данным о велоинфраструктуре, при этом картографические сервисы (например, Яндекс.Карты) получают полную информацию об открытых велопарковках и велодорожках.

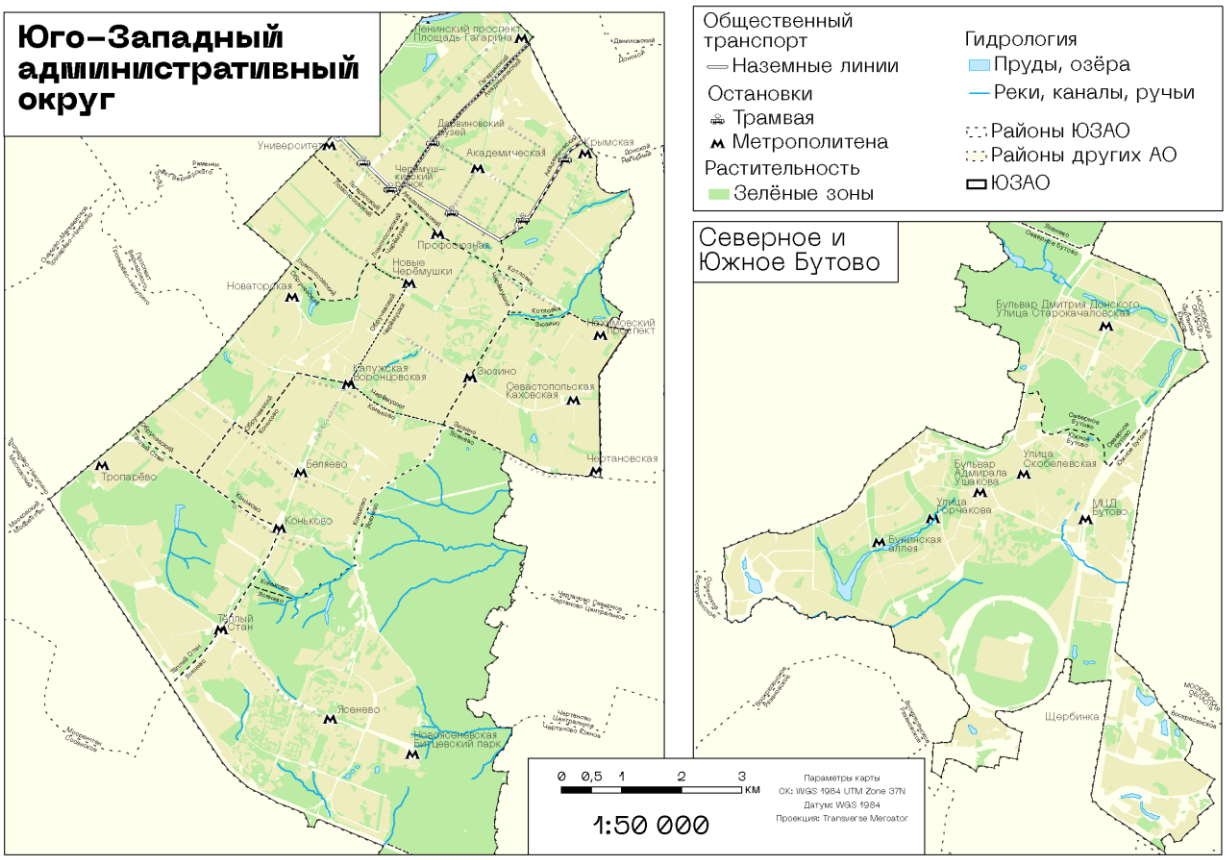


Рисунок 3 – Юго-Западный административный округ

Поскольку общей базы пространственных данных объектов этого вида транспорта не существует, а базы данных по отдельным показателям слишком разобщены, проектирование и составление карт велоинфраструктуры требует обязательного сбора полевых/городских данных. В связи с этим в ходе исследования были проведены полевые наблюдения качества инфраструктуры, выполнено фотографирование отдельных участков велодорог, перекрестков, проблемных пересечений веломаршрутов с маршрутами общественного транспорта. При дополнительной визуальной оценке парковок, велодорожек, тротуаров и улиц. выявлена зависимость между уклоном улицы и скоростью передвижения по ней. Из-за малой протяженности спусков и подъемов, низкой точности приборов учета скоростей и определения абсолютных высот точек, наличия большого количества остановок, коэффициенты функции скорости от уклона вычислить достаточно трудно. Вследствие этого влияние уклонов на скорость при построении маршрутов учтено на качественном, а не на количественном уровне. Тем не менее были выявлены некоторые зависимости между скоростью, комфортом передвижения на велосипеде и интенсивностью пешеходного движения, шириной тротуара, скоростью движения на проезжей части, качеством покрытия. С помощью систем видеонаблюдения были измерены потоки движения на велосипедах и самокатах.

Для поиска зависимости скорости движения от фактора рельефа была использована цифровая модель рельефа. Кроме подъемов, которые заставляют увеличивать интенсивность мышечной деятельности человека, в каждом конкретном месте важно учитывать и характеристики спусков на велосипеде. При движении вниз по склону увеличение скорости более очевидно,

но оно скрывает опасность травм. Отказы тормозов, неверная их настройка часто встречаются на собственных, а еще чаще на прокатных велосипедах.

По результатам изучения движения на улицах округа была выполнена их классификация по безопасности и пригодности к передвижению на велосипедах. В этой классификации были учтены положение улицы в транспортной структуре города и наличие приспособленной к передвижению на средствах индивидуальной мобильности инфраструктуры. Необходимость этого исследования была обусловлена тем, что ни одна из существующих систематизаций не выделяет классы улиц по пригодности для передвижения велосипедистов. Было выделено 4 категории: безопасные и удобные пути; улицы, на которых движение затруднено и существуют незначительные опасности передвижения; улицы, на которых движение затруднено и присутствуют значительные опасности; улицы, непригодные для движения СИМ. В результате к первой категории не было отнесено ни одной магистральной улицы, хотя именно здесь отмечен повышенный трафик пользователей СИМ. Например, по результатам полевых обследований было выявлено, что на Ломоносовском, Нахимовском проспектах, 6–10-полосных улицах – одни из самых высоких показателей количества пользователей СИМ среди всех улиц Москвы: около 100 велосипедистов и самокатов в час (около 1000 в день).

Для отдельных карт использовалась классификация участков улиц по аварийности. Для этого из открытых источников [Карта ДТП, дата обращения 15.04.2022] были получены пространственные данные о местах дорожно-транспортных происшествий, в которых содержится информация о погодных условиях, видах транспортных средств, количестве и степени тяжести пострадавших, числе погибших. Эмпирически была подобрана формула, которая помогает выявлять опасность отдельных участков улично-дорожной сети.

Результаты

По результатам теоретических исследований и городских обследований, разработана серия карт с отображением велоинфраструктуры ЮЗАО, наличия и плотности парковок для СИМ, доступности парковок и общественного транспорта для велосипедистов, аварий с велосипедистами и другие (масштабы 1:50000 и 1:100000). Полученные картографические изображения заключают в себе достаточно много информации, позволяющей анализировать явления и выявлять пространственные закономерности размещения велоинфраструктуры.

Прежде всего использовались стандартные графические приемы для изображения существующей велосипедной инфраструктуры (линейные знаки на рисунке 4 и значки на рисунке 5).

Классификация проведена по типу велодорожки и владельцу велопарковки соответственно. Такие карты позволяют установить существующий набор объектов исследования, оценить связность сети на качественном уровне.

Выделение кластеров велопарковок по анализу их доступности в совокупности со слоем зеленых зон (рисунок 6) позволяет сделать вывод о неприспособленности этих зон к использованию СИМ для велопешеходных прогулок, в том случае, когда пользователь транспортным средством приезжает к какому-либо участку в парке, а затем отправляется пешком в необходимом ему направлении. Такой прием позволяет находить недостатки инфраструктуры селитебных зон. Некоторые застроенные кварталы не обеспечены велопарковками даже в радиусе 500 м.

Рисунок 4 – Велосипедные дорожки ЮЗАО (на май 2022 года, фрагмент)

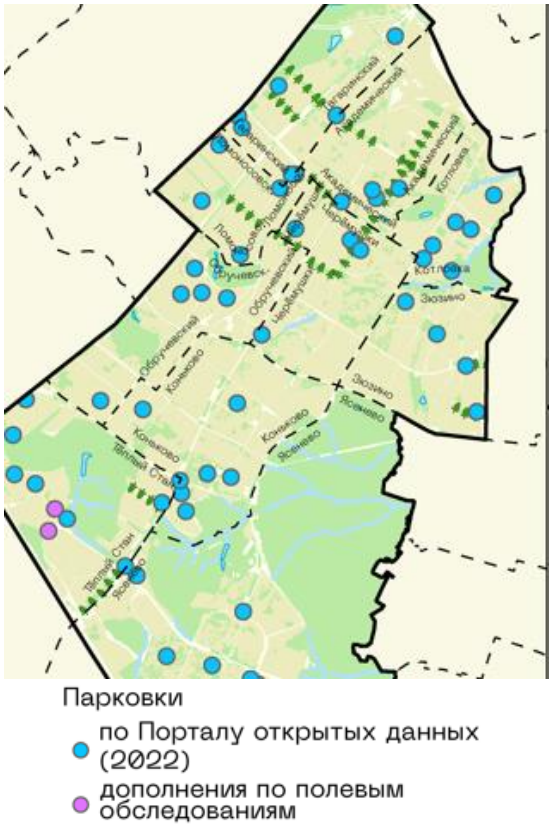


Рисунок 5 – Велосипедные парковки ЮЗАО (на май 2022)

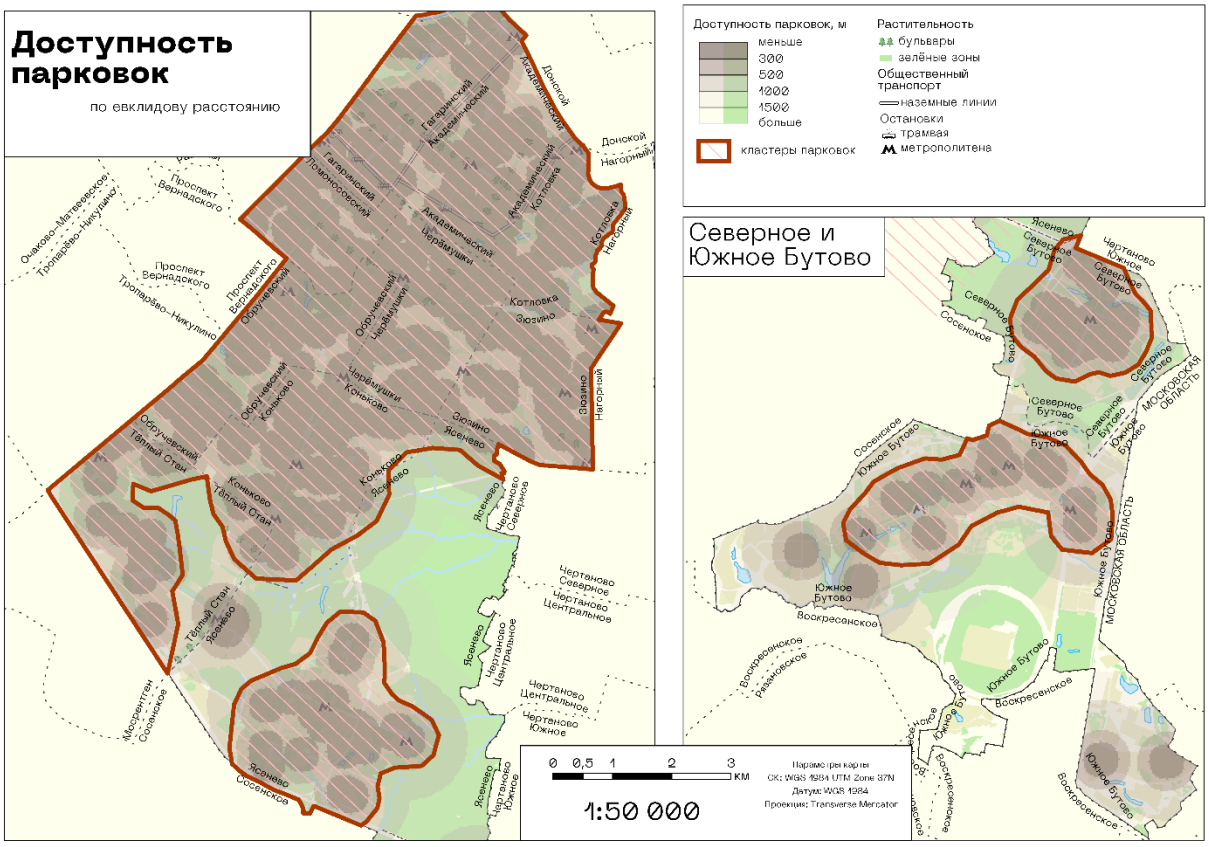


Рисунок 6 – Доступность парковок (по евклидову расстоянию)

Правильное сочетание графических приемов позволяет осуществлять пространственный анализ и составлять рекомендации по развитию инфраструктуры. В отличие от традиционных карт дорожной сети, на карте «Улицы с развитым движением СИМ» (рисунок 7), показана интенсивность движения по гексагональным участкам для всей территории округа. Такое представление позволяет учитывать трафик и в дворовых территориях, анализируя при этом связность внутриквартальных проездов и их приспособленность для движения СИМ. Значки на этой карте показывают вероятные места интереса пользователей СИМ: образовательные учреждения, офисы, торговые центры. Часто эти точки являются причиной повышенного трафика СИМ. Сооружение инфраструктурных объектов в аналогичных местах, но с меньшим трафиком, позволит увеличить количество пользователей СИМ в новых районах.

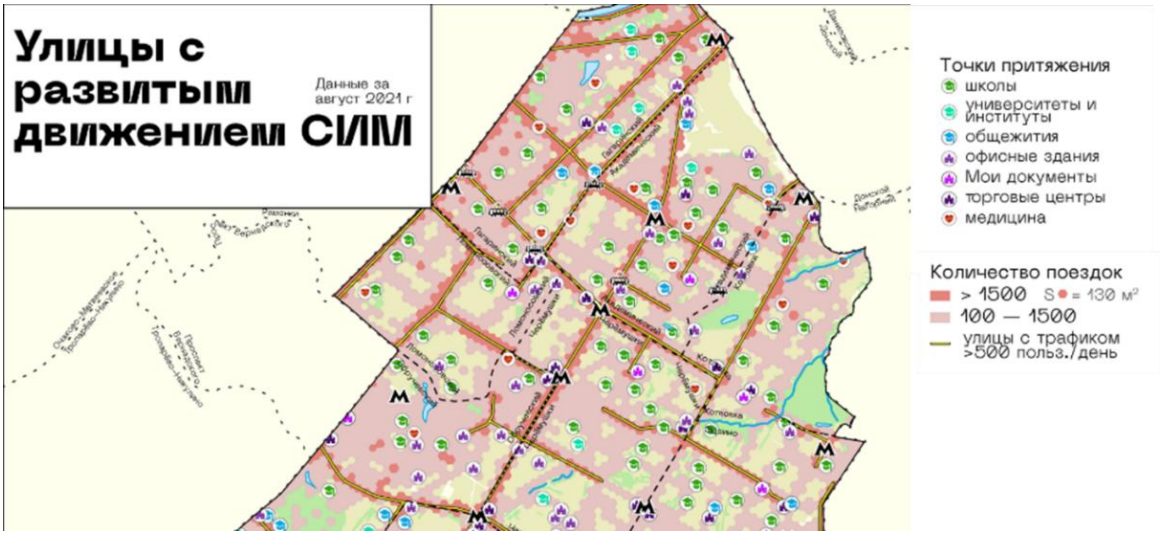


Рисунок 7 – Улицы с развитым движением СИМ: фрагмент карты и легенда

Количество аварий с участием СИМ на улицах зависит от качества инфраструктуры, количества поездок на этом виде транспорта. Каждая улица округа показана линейным знаком, ширина которого пропорциональна количеству полос движения на участке. В сочетании с качественной характеристикой дорог (цвет показывает аварийность, выраженную в баллах), карта позволяет увидеть относительную безопасность улиц для пользователей СИМ.

Объектом картографирования может выступать не только велоинфраструктура. На картах возможно отображение различных точек притяжения и их обеспеченности соответствующими элементами инфраструктуры (рисунок 8). Такие изображения позволяют выделить те объекты, которые необходимы для анализа, а затем оценить их включенность в инфраструктурную сеть округа. На карте реализован такой принцип для станций метро.

Заключение

Несмотря на то, что велосипеды и самокаты сейчас выделяются в самостоятельный вид транспорта, крупномасштабное картографирование инфраструктуры для СИМ в городах практически не представлено. Совокупность городских обследований и использования статистических данных позволяет оценить параметры безопасности, удобства маршрутов, пространственное развитие сети. Результатом исследования стало формирование базы данных «Обеспеченность улиц ЮЗАО велоинфраструктурой», создание на ее основе серии из 11 карт

«Велоинфраструктура ЮЗАО г. Москвы».

Рисунок 8 – Аварийность с участием велосипедистов: фрагмент карты и легенда

Были предложены способы изображения и графические приемы для показа на картах велосипедного движения и инфраструктуры, опробована методика полевых и камеральных исследований для ее картографирования. Материалы статьи могут иметь практическую значимость для представителей органов власти города, быть учтены для дальнейшего успешного функционирования отдельных городских пространств и, как следствие, корректировать развитие региона.

Список литературы

Почему развитие велоинфраструктуры может быть выгодным / Коммерсант [Электронный ресурс]. – URL: http:// https://www.kommersant.ru/doc/4996607 (дата обращения 10.06.2022).

Study Finds Protected Bike Lanes Increase Traffic Safety for Everyone-Including Drivers / Pasadena Complete Streets Coalition [Электронный ресурс]. – URL: https://www.pasadenacsc.org/blog/protected-bike-lanes-increase-traffic-safety-for-everyone (дата обращения 11.05.2022).

Wessel N., Widener M. Rethinking the Urban Bike Map for the 21st century. // Cartographic Perspectives. – 2015. – No 81. – pp. 6–22. DOI: 10.14714/CP81.1243.

Routing / Geovelo [Электронный ресурс]. – URL: https://www.geovelo.fr/france/ (дата обращения 15.12.2021).

Strava Global Heatmap: карта / Strava. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.strava.com/heatmap#17.19/37.57748/55.70040/hot/ride (дата обращения 15.12.2021, с марта 2022 недоступен в РФ).

Тепловая карта: ПРОдвижение / ЦОДД [Электронный ресурс]. – URL: https://prodvizhenie.mos.ru/ (дата обращения 15.12.2021).

Whoosh: 8 из 10 поездок на кикшеринге в Москве происходят по транспортному сценарию / Трушеринг [сайт]. – URL: https://truesharing.ru/news/28152/ (дата обращения

16.12.2021).

Mapping the Urban Bike Utopias of the 1890s / National Geographic [сайт]. – URL: https://www.nationalgeographic.com/culture/article/historical-urban-bike-maps (дата обращения 13.04.2022).

Портал открытых данных: станции проката велосипедов / Правительство Москвы [электронный ресурс]. – URL: https://data.mos.ru/opendata/918 (дата обращения 5.04.2022)

Arranz-Lopez A., Soria-Lara J., Ariza-Alvarez A. An end-user evaluation to analyze the effectiveness of cartograms for mapping relative non-motorized accessibility // EPB: Urban Analytics and City Science. – 2021. – Vol. 48. – Is. 9. – pp. 1–18. – DOI: https://doi.org/10.1177/2399808321991541.

Aranda-Corral G.A., Rodríguez M.A., Fernández de Viana I., Arenas M.I.G. Genetic Hybrid Optimization of a Real Bike Sharing System // Mathematics. – 2021. – Vol. 9. – 2227. DOI: doi.org/10.3390/math9182227Mathematics.

Bartzokas-Tsiompras A., Photisa Y.N., Tsagkisa P., Panagiotopoulos G. Microscale walkability indicators for fifty-nine European central urban areas: An open-access tabular dataset and a geospatial web-based platform // Data in Brief. – 2021. – Vol. 36. – 107048. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107048

Карта ДТП // А. Радченко и др. [электронный ресурс]. – URL: https://dtp-stat.ru/ (дата обращения 15.04.2022).

Сведения об авторах

Даниил Александрович Корнилов – студент 4 курса бакалавриата кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Елена Андреевна Прохорова – доцент кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук

Картографирование изменений типов берега озера Севан в условиях регуляции уровня воды

Кузнеченко П.А., Алексеенко Н.А., Медведев А.А.

Берега крупных водоемов – это зоны контакта двух контрастных геосистем высокого ранга. Такие зоны всегда характеризуются высокой интенсивностью и широким разнообразием идущих процессов. Антропогенное освоение водоема дополнительно увеличивает нагрузку на ландшафт, еще сильнее ускоряет идущие процессы и меняет их. В том числе изменениям могут подвергаться факторы формирования берегового рельефа – например, может происходить ускорение абразии или заболачивание. Эти изменения оказывают сильное влияние на прибрежные ландшафты и подвергают риску хозяйственные объекты, поэтому при таком сильном антропогенном воздействии, как регуляция уровня воды, изменения требуется изучать и постоянно контролировать. Одним из крупных водоемов, где необходим контроль, является озеро Севан в Армении – в середине XX века вследствие антропогенного вмешательства уровень воды в нем упал на 13 метров, в настоящее же время ведутся работы по его восстановлению. Картографические материалы послужат основой для проведения анализа изменений, произошедших за период активной регуляции уровня воды Севана, и для разработки дальнейших проектов и планов освоения озера.

Ключевые слова: береговой рельеф, геоморфологическое картографирование, картографирование динамики, регуляция уровня воды

Mapping of changes in shore types of Lake Sevan under conditions of water level regulation

Kuznechenko P.A., Alekseenko N.A., Medvedev A.A.

The shores of large water reservoirs are the contact zones of two contrasting high-ranking geosystems. Such zones are always characterized by high intensity and a wide variety of ongoing processes. Anthropogenic development of the reservoir and its shores additionally increases the pressure on the landscape, further increases ongoing processes and changes them. Among other things, factors in the formation of coastal relief may be subject to changes – for example, acceleration of abrasion or waterlogging. These changes have a strong impact on the coastal landscapes and put anthropogenic objects at risk, therefore, with such a strong impact as water level regulation, changes need to be studied and constantly monitored. One of the large reservoirs where such control is needed is Lake Sevan in Armenia. In the middle of the 20th century, due to anthropogenic interference, the Sevan's water level dropped by 13 meters. Currently work is underway to restore it. Cartographic materials will serve as a basis for analyzing the changes that happened during the period of active exploitation of Sevan, and for further projects and plans for the development of the lake.

Keywords: coastal relief, geomorphological mapping, dynamics mapping, water level regulation

Введение

Искусственное регулирование уровня воды в водоеме – серьезное антропогенное вмешательство, последствия которого для экосистемы крайне сложно предсказать. Воздействие на гидрологический режим водоема способно напрямую или косвенно повлиять на химический состав воды, на биоразнообразие водоема, а также на прибрежные ландшафты, в том числе на доминирующие береговые процессы и, как следствие,

на геоморфологические типы побережья [Каплин, 2010].

Озеро Севан – это памятник природы мирового масштаба, крупнейший источник пресной воды в Закавказье и важнейший водный ресурс Республики Армения, содержащий более 80 % объема пресной воды страны [Национальная программа действий по борьбе с опустыниванием в Армении, 2002]. В последние несколько десятилетий озеро подвергается активной эксплуатации, которая привела к непредвиденным последствиям: вследствие начавшегося в конце 1930-х годов антропогенного освоения к 60-м годам XX века уровень воды отступил более, чем на 13 метров. В результате был полностью перестроен береговой комплекс, формирующий природные условия для ряда видов хозяйственной деятельности на побережье [Medvedev et al., 2020]. В последние годы были запущены проекты по восстановлению экосистемы Севана, в результате чего он снова претерпевает серьезные изменения [Матишов, 2016].

Объектом представленного исследования является берег озера Севан и изменение факторов его формирования. Цель работы – составление разновременных картографических материалов на территорию берега озера Севан для анализа динамики факторов его образования и прогнозов дальнейших изменений.

Материалы и методы

В качестве источников пространственных данных в работе использовались архивные карты, а также современные космические снимки и данные полевой аэрофотосъемки и наземных описаний.

Исходя из характеристик имевшихся в ходе исследования источников пространственных данных, с точки зрения точности и временных рамок активного антропогенного освоения озера и периоды его наибольшей активности, было принято решение разделить составление картографических материалов на следующие этапы:

- составление карт реконструкции геоморфологических типов берега в период до начала антропогенного освоения;
- составление карт современных геоморфологических типов берега;
- объединение полученных карт в единые карты динамики.

Для реконструкции типов берега в период до начала активного антропогенного освоения водных ресурсов озера были задействованы архивные топографические карты 1942 года – согласно графику, представленному в статье А. А. Медведева с соавторами, к этому году освоение уже началось, однако шло недостаточно активно [Medvedev et al., 2020].

Также для карт на этот временной срез использовалась уникальная батиметрическая карта 1929 года, предоставленная руководством Армянской академии наук (АН). Эта карта отличается достаточно низкой по современным меркам точностью и погрешностями привязки в силу дефектов при сканировании, поэтому по ней нельзя достоверно судить о возможном отступании уровня воды еще до 40-х годов XX века (об этом есть свидетельства в некоторых докладах [Jenderedjian, 2006], [Давыдов, 1938]). Однако эта карта ценна тем, что является единственным доступным картографическим материалом на озеро Севан в относительно крупном масштабе (1:300 000), созданным до 1942 года и однозначно относящимся к периоду до начала антропогенного освоения.

При составлении карт современного состояния берегов использовались космические снимки, а также аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА) и полевые описания. Мозаики снимков со спутника *GeoEye-1* использовались в качестве основы для векторизации современной береговой линии, а также для фор-

мирования эталонов при составлении современных карт типов берегов.

Все данные съемки с БПЛА, а также наземные полевые данные были получены в ходе нескольких экспедиций на озеро (2018 – 2019гг.). Для аэрофотосъемки использовался квадрокоптер *DJI Phantom 4 Pro,* оснащенной камерой с разрешением 20 Мп, которая позволяет делать снимки размером до 5472 × 3648 пикселов [www.dji.com]. Из полученных снимков при помощи ПО Agisoft Metashape составлялись ортофотопланы с пространственным разрешением от 2 до 12 см.

Для разработки основного содержания разновременных геоморфологических карт берегов озера Севан было рассмотрено несколько литературных источников авторства советских геоморфологов. На их основе были составлены классификации берегов по состоянию как на 1929 год, так и на 2019 год.

Соединив базовое разделение берегов по волновому воздействию В. П. Зенковича с более широкой генетической классификацией О. К. Леонтьева, дополненной Г. А. Сафьяновым, мы получили смешанную классификацию, подходящую для задач и уровню точности источников исследования по подробности. Утвержденная классификация представлена на рисунке 1.

Полученная схема была использована как основа для выделения современных типов берега и составления легенды карт на соответствующий временной срез.

Результаты

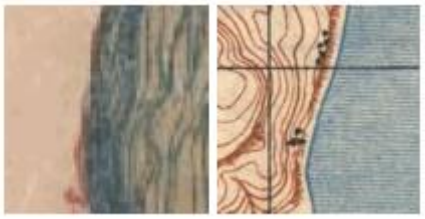
На период до начала антропогенного освоения по топографической и батиметрической карте была составлена среднемасштабная обзорная карта типов берегов. Оцифрованная береговая линия была разбита на 624 фрагмента, объединенных в пять типов, статистика по которым представлена в таблице 1.

Рисунок 1 – Схема выделения типов берегов в современном состоянии

Типы берега, как правило, выделялись уверенно, неоднозначности возникали в основном при определении границ абразионных, аккумулятивных и переходных (абразионно-аккумулятивных) берегов. Однако участок побережья с частым распространением данного типа составляет лишь 10–12 % от общей длины береговой линии, поэтому в целом выделение можно назвать достоверным. В качестве подложки для карты была выбрана цифровая модель рельефа *SRTM30*, а также полученная на основе оцифровки Батиметрической карты 1929 года цифровая модель донного рельефа. Дополнительное содержание на карту не наносилось. Полученная карта типов берега по состоянию на 1929 год представлена на рисунке 2.

На 2019 год также была составлена среднемасштабная обзорная карта. Она была полностью основана на классификации современных типов берега.

Таблица 1 – Типы берега в изначальном состоянии, выделенные на основе визуальной классификации

Тип берега в изначальном состоянии	Количество фрагментов береговой линии	Общая длина фрагментов, км	Доля от общей длины береговой линии, %	Пример выделения на основе сопоставления изобат на батиметрической карте (слева) и горизонталей на топографической (справа)
*Высокий расчлененный приглубый берег с развитыми абразионными процессами**	*57*	*23,2*	*9,6*	
Высокий расчлененный приглубый берег с развитыми абразионными и аккумулятивными процессами	*138*	*52,6*	*21,9*	
Высокий расчлененный приглубый берег, сформированный субаэральными или тектоническими процессами и малоизмененный волновым воздействием	*202*	*77,1*	*32,0*	
Низкий нерасчлененный отмелый берег с развитыми аккумулятивными процессами	*112*	*43,9*	*18,2*	
Низкий нерасчлененный отмелый берег, сформированный аккумуляцией постоянного водотока	*115*	*44,6*	*18,4*	
ВСЕГО	*624*	*241,4*	*100*	

* – здесь и далее определение генетического происхождения делается на уровне предположения

Классификация разработана преимущественно на основе данных аэрофотосъемки и наземной фотосъемки. Однако съемка с БПЛА велась только на ключевых, наиболее характерных участках. После определения типа берега для каждого из них были классифицированы участки, на которых проводилась только наземная фотосъемка.

Достаточно большие участки берега оказались не охвачены ни наземной фотосъемкой, ни аэрофотосъемкой – для них классификация была проведена по мозаике *GeoEye-1* на 2017 год. Сопоставление дешифровочных признаков различных типов берега на космическом

снимке с эталонами, выделенными по аэрофотосъемке и наземной фотосъемке, представлено в таблице 2.

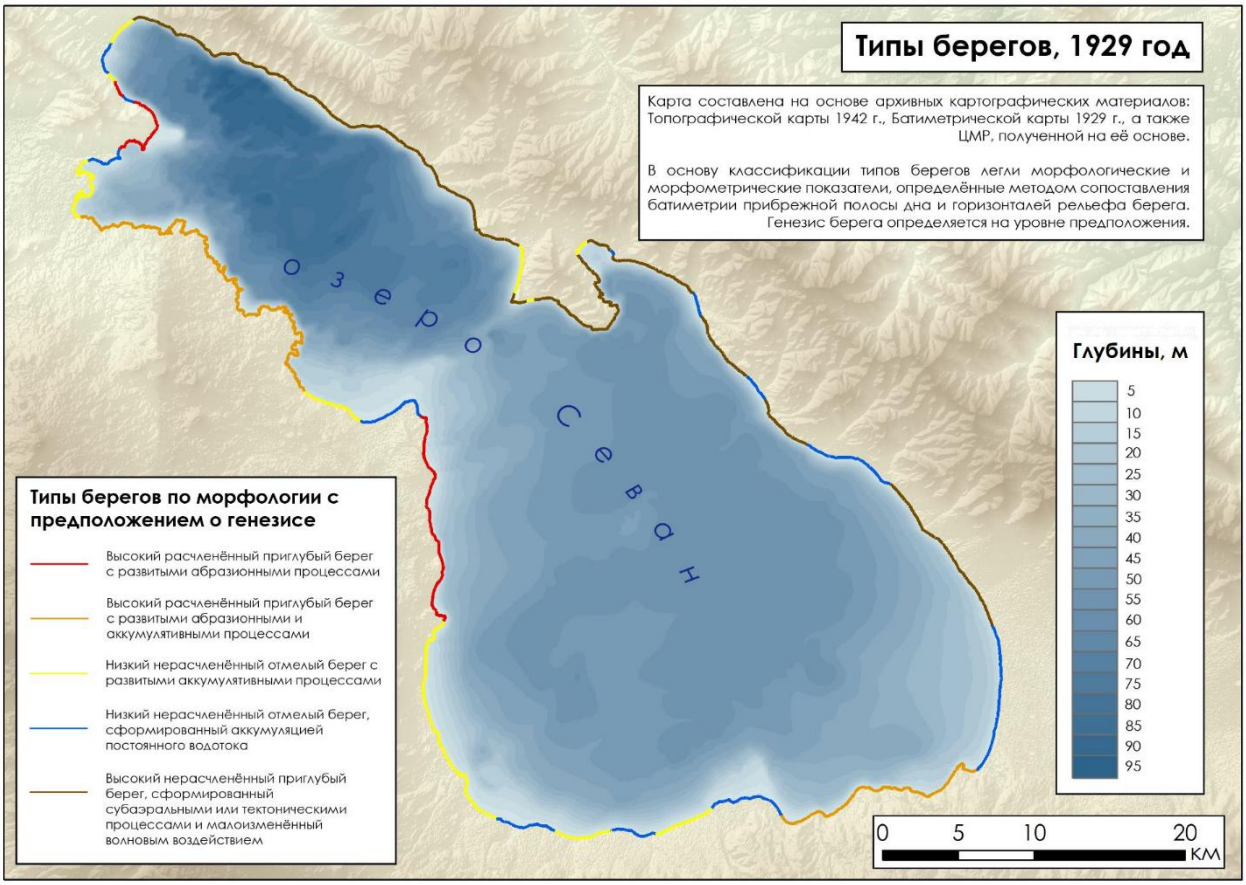
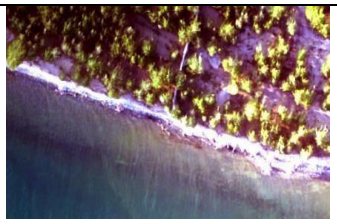
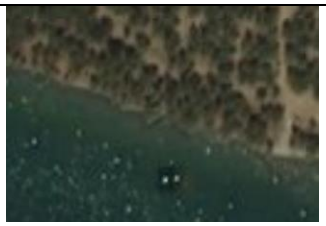
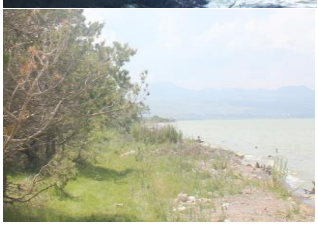
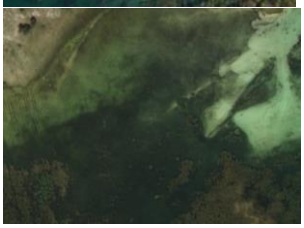


Рисунок 2 – Карта геоморфологических типов берегов озера Севан на 1929 год

На ключевых участках, где проводилась и наземная фотосъемка, и аэрофотосъемка, все типы берегов идентифицировались в силу очень высокого разрешения источников крайне уверенно. На тех участках побережья, которые определялись на основе сопоставления по снимкам *GeoEye-1*, типы берега можно классифицировались чуть менее явно: по снимку нередко сложно отличимы друг от друга маршевые берега и берега, сформированные постоянными водотоками. Кроме того, граница перехода между абразионными, аккумулятивными и смешанным (абразионно-аккумулятивным) типом берега вновь не всегда дешифрировалась уверенно. Однако «сложные» участки снова составили в целом не более 6–7 % от общей длины береговой линии, поэтому в целом достоверность дешифрирования можно считать весьма высокой.

На составленную среднемасштабную карту современных типов берега дополнительного содержания не наносилось, в качестве подложки была выбрана общедоступная ЦМР SRTM30, а также полученная на основе оцифровки Батиметрической карты 1929 года цифровая модель донного рельефа. Дополнительное содержание на карту не наносилось. Результат представлен на рисунке 3.

Таблица 2. Эталоны для определения современного типа берега по космическому снимку GeoEye-1, снимкам с БПЛА и наземной фотосъемки

	Наземная фотосъемка (IPhone 6s)	**Аэрофотосъемка (*DJI Phantom 4 Pro*)**	**Космический снимок (*GeoEye-1*)**
Берег, сформированный волновым воздействием, с активным развитием абразии			
Берег, сформированный волновым воздействием, с активным развитием аккумуляции			
Берег, сформированный волновым воздействием, с развитием абразии и аккумуляции			
Берег, формирующийся под воздействием аккумуляции постоянного водотока			
Частично сформированный волновым воздействием, маршевый берег			

Кроме того, на основе составленных разновременных среднемасштабных карт была составлена объединяющая итоговая карта – карта изменений и переходов из одного типа в другой, произошедших с 1929 по 2019 гг. Она представлена на рисунке 4. Подложка для карты была выбрана аналогичная карте современных типов берегов, из дополнительного содержания на карте ареалом была выделена зона осушки – территория, высвобожденная из-под воды за исследуемый период.

Подложка для карты была выбрана аналогичная карте современных типов берегов, из дополнительного содержания на карте ареалом была выделена зона осушки – территория, высвобожденная из-под воды за исследуемый период.

По составленным геоморфологическим картам был произведен ряд статистических вычислений, на основе которых были сделаны некоторые выводы и предположения.

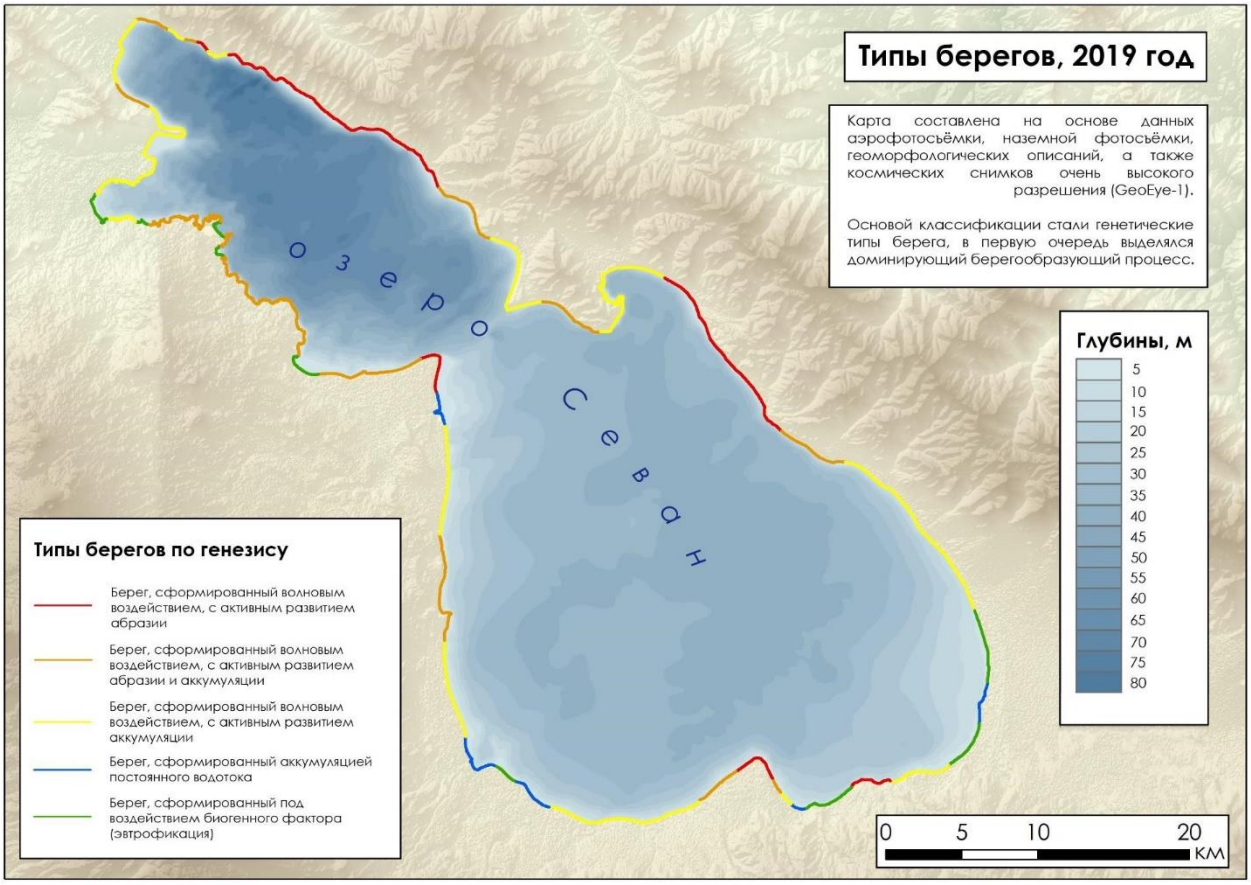


Рисунок 3 – Карта геоморфологических типов берегов озера Севан на 2019 год

Были рассчитаны и зафиксированы следующие величины:

- Длина береговой линии по состоянию на 1929 год – 241,5 километров;
- Длина береговой линии по состоянию на 2019 год – 232,7 километров (в пределах погрешности);
- Площадь высвобожденного из-под воды в период 1929–2019 гг. берега – 151,8 км².

При этом, так как для составления карты были использованы источники разного масштаба и разрешения, нужно принять во внимание погрешность вычисления данных величин, соответствующую наименее точному из источников – Батиметрической карте масштаба 1:300 000.

Основные статистические вычисления были сделаны по сводной карте (рисунок 4), где представлены оба временных среза.

Для оценки переходов типов берегов по состоянию на 1942 год в современные типы между разновременными положениями береговой линии было рассчитано модифицированное расстояние Хаусдорфа – мера удаленности двух траекторий друг от друга, использующаяся в географических исследованиях для оценки расстояния между двумя сложными линейными объектами [Min, 2007; Shao, 2010].

Максимальное рассчитанное расстояние между разновременными положениями береговой линии – 3260 метров (среднее – 605 метров, среднеквадратическое отклонение – 563 метров).

Кроме того, на основе полученных отрезков между разновременными положениями береговой линии была составлена матрица переходов между разными типами берегов в изначальном состоянии и современными типами. Для этого был выполнен следующий алгоритм действий:

1) Добавление в атрибутивную таблицу

отрезков модифицированного расстояния Хаусдорфа полей *old_type* и *new_type;*

2) Выделение точек пересечения отрезков с береговыми линиями;
3) Получение атрибутивной информации на пересечениях.

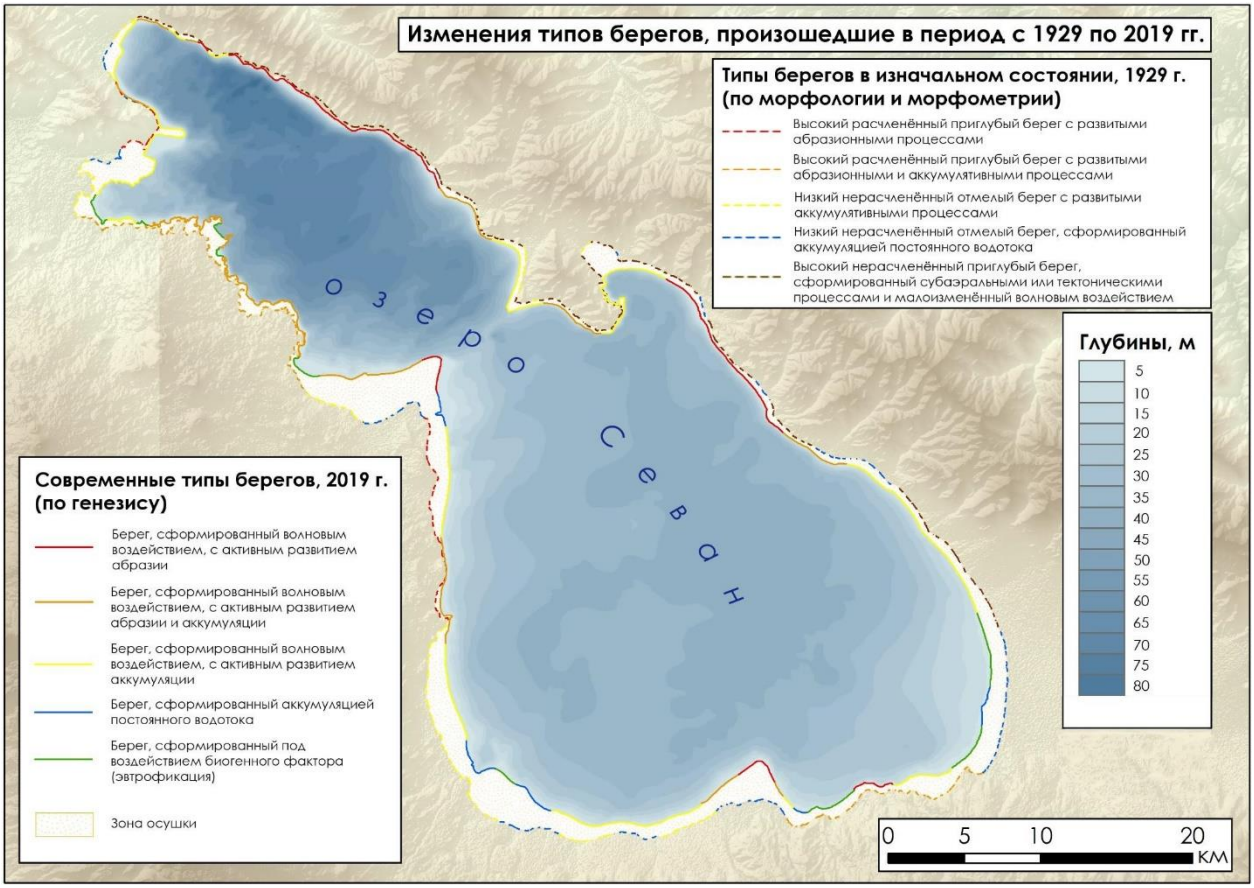


Рисунок 4 – Карта изменений типов берегов, произошедших за период антропогенного освоения

В результате атрибутивная таблица отрезков модифицированного Хаусдорфова расстояния стала содержать информацию о том, какой тип берега в изначальном состоянии с каким современным типом каждый отрезок соединяет. Общая выборка составила 8154 отрезка, все данные заносились в матрицу переходов, представленную в таблице 3.

Из таблицы следует, что до начала падения уровня воды наибольшую долю (32 %) в структуре побережья озера Севан составляли высокие тектонические берега, малоизмененные волновым воздействием – на карте на рисунке 3 они занимают почти всю длину северо-восточной береговой линии. Наименее широко были представлены высокие абразионные берега – они составляли менее 10 % побережья. Низкие побережья с вероятно развитой аккумуляцией занимали почти треть от всего побережья (18,2 % – берега, предположительно сформированные волновой аккумуляцией и 12,9 % – берега, предположительно сформированные аккумуляцией водотоков). К промежуточному абразионно-аккумулятивному типу было отнесено 21,9 % береговой линии.

Таблица 3. Матрица переходов между типами берегов в изначальном состоянии и современными типами

Тип берега в изначальном состоянии (до 1943 г.)	Длина береговой линии, км (доля от общей длины, %)	Современный тип берега	Сформированный волновым воздействием, абразионный	Сформированный волновым воздействием, абразионно-аккумулятивный	Сформированный волновым воздействием, аккумулятивный	Формирующийся под воздействием аккумуляции постоянного водотока	Формирующийся под воздействием биогенного фактора (эвтрофикация)
		Длина береговой линии, км (доля от общей длины, %)	*41,4 (17,8)*	*65,5 (28,1)*	*89,8 (38,6)*	*12,6 (5,4)*	*23,4 (10,1)*
*Высокий расчлененный приглубый, абразионный**	*23,2 (9,6)*	*Доля от общего числа переходов из типов изначального состояния в современные / среднее значение отступания береговой линии при переходе*	*–*	*2,6 % / 116 м*	*5,4 % / 863 м*	*0,7 % / 803 м*	*–*
Высокий расчлененный приглубый, абразионноаккумулятивный	*52,6 (21,9)*		*1,0 % / 453 м*	*29,7 % / 396 м*	*9,5 % / 543 м*	*0,2 % / 890 м*	*7,9 % / 513 м*
Высокий расчлененный приглубый, сформированный тектоническими процессами и малоизмененный волновым воздействием	*77,1 (32,0)*		*8,4 % / 170 м*	*4,9 % / 243 м*	*11,1 % / 376 м*	*–*	*0,1 % / 1015 м*
Низкий нерасчлененный отмелый, аккумулятивный	*43,9 (18,2)*		*–*	*1,8 % / 1459 м*	*6,2 % / 950 м*	*1,5 % / 1217 м*	*2,0 % / 1101 м*
Низкий нерасчлененный отмелый, сформированный аккумуляцией постоянного водотока	*31,3 (12,9)*		*2,2 % / 1102 м*	*2,4 % / 1326 м*	*4,3 % / 983 м*	*2,3 % / 1628 м*	*1,8 % / 1247 м*

В современной типологии берегов картина значительно поменялась. В первую очередь стоит отметить полное отсутствие в легенде такого класса как тектонический берег, неизмененный волновым воздействием – все 77 километров береговой линии, отнесенные к этому типу в классификации изначального состояния были преобразованы теми или иными процессами в результате опускания уровня воды. Значительно возросли доли всех типов берегов, сформированных волновым воздействием, появился дополнительный тип берега, классифицированный как биогенный – он выделялся на тех участках побережья, где из-за процесса эвтрофикации не было возможности четко выделить положение границы воды и суши.

Что касается переходов типов берега в изначальном состоянии в современные типы, то в первую очередь стоит заметить, что генезис берега не изменился только у одной трети берегов (38,2 % береговой линии). Наибольшее число переходов (29 % от общего числа) зафиксировано между высоким, предположительно абразионно-аккумулятивным берегом в изначальном состоянии и современным абразионно-аккумулятивным берегом. Этот факт отчасти можно объяснить издержками выделения переходов – отрезки модифицированного расстояния Хаусдорфа строятся по узловым точкам береговой линии, что значительно увеличивает их плотность на участках с высоким коэффициентом извилистости (а наибольшая извилистость характерна именно для абразионно-аккумулятивного типа берега, где абразионные обрывы перемежаются с пляжами и отмелями).

Однако наибольший интерес представляет состояние тех берегов, которые в своем изначальном состоянии были классифицированы как тектонические неизмененные – треть из них (8,4 % от всей береговой линии, более 20 километров) подвержены сильной абразии, еще около 14 км подвержены одновременно абразионным и аккумулятивным процессам, что также можно охарактеризовать как опасную и нестабильную ситуацию для хозяйственных объектов, расположенных на побережье.

Также стоит отдельно отметить трансформацию берега, изначально классифицированного как высокий абразионный – сейчас по всей его длине были зафиксированы разной степени интенсивности процессы аккумуляции.

Среднее значения отступания береговой линии при переходе фиксировалось в таблице, скорее, как вспомогательная величина – она помогает верифицировать правильное выделение типов берегов по определенным закономерностям. Так, наибольшие значения отступания ожидаемо были зафиксированы при переходах из низких отмелых берегов в современные аккумулятивные (средние значения везде превышают 1000 м, наибольшее из средних – 1628 м, зафиксированное при сохранении аккумуляции постоянного водотока на участке побережья), наименьшие – при переходе из высоких приглубых берегов в современные абразионные или абразионно-аккумулятивные (средние значения не превышают 500 м, наименьшее из средних – 116 м, зафиксированное при трансформации высокого приглубого абразионного берега в современный абразионно-аккумулятивный берег).

Выводы

Таким образом, в ходе анализа полученных картографических материалов, при помощи методов геоинформационного анализа был выявлен ряд тенденций, касающихся долговременных изменений побережья озера. Изменения типов берегов озера Севан на протяжении всего периода антропогенного вмешательства могут быть охарактеризованы так:

- В структуре побережья озера полностью исчез такой тип берега, как малоизмененный волновым воздействием тектонический берег – в результате опускания уровня воды по всей его длине (около 77 километров) стали активны разнообразные берегообразующие волновые процессы;
- В формировании облика побережья значительно увеличилась роль биогенного фактора – эвтрофикация озера повлекла за собой такое увеличение биомассы в прибрежной зоне, что на некоторых участках побережья определить положение береговой линии стало невозможно даже при аэрофотосъемке в сверхвысоком пространственном разрешении;
- Значительно большее распространение в сравнении с исходным состоянием побережья получили абразионные берега – наименее стабильные участки, где идет активное разрушение берега.

Список литературы

Давыдов В. К. Водный баланс озера Севан. // Материалы изучения озера Севан и его бассейна. – Гидрометиздат, Ленинград. № 6. – 1938. – с. 12-82.

Зенкович В.П. Морской берег. // Гос. изд-во технико-технической литературы – 1952. – 84 с.

Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов. // М. Изд-во АН СССР – 1962. – 710 с.

Каплин П.А., Лукьянова С. А. Береговая зона и подъем уровня океана // Вопросы геоморфологии и палеогеографии морских побережий и шельфа. – 2010. – с. 492–507.

Леонтьев О. К. Геоморфология морских берегов и дна / Под ред. проф. В. П. Зенковича, проф. И. С. Щукина. // М.: Изд-во Моск. ун-та. – 1955. – 380 с.

Леонтьев О.К. Основы геоморфологии морских берегов // Издательство Московского университета, Москва. – 1961. – 407 с.

Матишов Г.Г. Современное состояние и проблемы изучения озера Севан. // Наука Юга России (Вестник Южного Научного центра). №2. – 2016. – с. 43-52.

Национальная программа действий по борьбе с опустыниванием в Армении // Министерство охраны природы Армении. – 2002. – 193 с.

Рычагов Г.И. Общая геоморфология: учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Изд-во Моск. ун-та: Наука. – 2006. – 416 с.

Сафьянов Г.А. Геоморфология морских берегов // Московский государственный университет, Географический факультет. – 1996. – 400 с.

Jenderedjian K. Lake Sevan // Experience and Lessons Learned Brief. – 2006. – p. 347-362

Medvedev A., Alekseenko N., Telnova N. Uav-derived data application for environmental monitoring of the coastal area of lake Sevan, Armenia with a changing water level // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12. – No. 22.

Micklin P. The Aral Sea Disaster // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. – 2007. – Vol. 35. – pp. 47-72.

Min D., Zhilin L., Xiaoyong C. Extended Hausdorff distance for spatial objects in GIS // International Journal of Geographical Information Science. – 2007. – Vol. 21. – No 4. – pp. 459-475.

Shao F., Cai S., Gu J. A modified Hausdorff distance based algorithm for 2dimensional spatial trajectory matching // 5th International Conference on Computer Science and Education. – 2010. – pp. 166-172.

Официальный сайт компании DJI [Электронный ресурс]. – URL:

https://www.dji.com/ru. (Дата обращения: 18.11.2021).

Сведения об авторах

Петр Антонович Кузнеченко – аспирант кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Наталья Анатольевна Алексеенко – доцент кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук

Андрей Александрович Медведев – заведующий лабораторией картографии ИГ РАН, кандидат географических наук.

Моделирование Фобоса на основе референц-поверхности трехосного эллипсоида

Михайлова М.В., Ныpцов М.В.

В статье рассмотрена методика создания трехмерных моделей небесных тел в форме трехосного эллипсоида на примере Фобоса – одного из спутников Марса. Предварительно изучена история исследования спутника и рассмотрены системы отсчета широт и долгот в соответствии с рекомендациями Международного астрономического союза. Также описаны источники информации, использующиеся в работе, и основные программные продукты. Процесс моделирования разделен на два основных этапа: первый – работа с изображением на плоскости, второй – процесс трехмерного моделирования. В результате был получен глобус Фобоса в форме трехосного эллипсоида. Авторы пришли к выводу о том, что рассмотренную методику можно использовать для любых небесных тел, аппроксимирующихся шаром, эллипсоидом вращения или трехосным эллипсоидом, при незначительной ее доработке.

Ключевые слова: картографическая проекция, небесное тело, глобус

Triaxial ellipsoid reference surface for Phobos modelling

Mikhaylova M.V., Nyrtsov M.V.

The three-dimensional modelling methodology of a celestial body in the form of a triaxial ellipsoid is developed. Phobos, one of the satellites of Mars is the object of the study. At the beginning, the research history of the satellite is studied. Also, the reference systems of latitudes and longitudes are considered based on the International Astronomical Union recommendations. The data sources and the software used for modelling are described. The modelling process includes two stages. In the first place, mapping of the satellite surface was carried out. In the second place, the three-dimensional modelling process was performed. As a result, the globe of Phobos was obtained in the form of a triaxial ellipsoid. The considered methodology can be used with minor improvements for celestial bodies approximated by a sphere, spheroid, or triaxial ellipsoid.

Keywords: map projection, celestial body, globe

Введение

Фобос – один из двух спутников Марса. Он был открыт американским астрономом Асафом Холлом 18 августа 1876 года. Благодаря полетам в дальний космос картографирование и моделирование внеземных объектов получили возможность использования большого количества тематической информации, которую можно визуализировать в виде карт и моделей. Выбор проекции является важной задачей при проектировании карт внеземных объектов. Малые небесные тела не обладают достаточной массой для достижения гидростатического равновесия, поэтому их фигуры нерегулярны. Такие типы тел Международный астрономический союз (МАС) рекомендует аппроксимировать трехосным эллипсоидом, а значит перед картографом возникает задача использования проекций для этой референц-поверхности.

На данный момент разработан определенный набор картографических проекций для различных референц-поверхностей (сферы, эллипсоида вращения, трехосного эллипсоида). Компоновка карт в этих проекциях представляется либо в виде шести полушарий с различными осевыми меридианами (в случае азимутальных проекций),

либо в виде прямоугольника (если используются цилиндрические проекции). При этом очевидна проблема, связанная с нарушением восприятия целостности изображения поверхности небесного тела. Представление же в виде математически определенного трехмерного тела (например, трехосного эллипсоида) позволяет минимизировать искажения и упростить визуальный анализ подобно использованию классического глобуса.

Указанная проблема ранее поднималась в различных исследованиях, результатом которых становились гладкие или рельефные глобусы исследуемого небесного тела [Wählisch et al., 2014; История…].

Параллельно с разработкой моделей шли исследования проекций для их построения. Стоит отметить, что для глобусов Земли используют многополосные проекции, видоизмененные равнопромежуточные вдоль меридианов азимутальные проекции, шаровые проекции, различные поликонические проекции и т. д. В 1992 году Львом Моисеевичем Бугаевским и рядом других ученых был предложен способ создания глобуса небесного тела на основе трехосного эллипсоида. Благодаря представлению сегментов в предложенной им проекции, модель становилась максимальна подобной физическим и морфометрическим характеристикам небесного тела [Бугаевский и др., 1989].

В отличие от предыдущих работ, в текущем исследовании глобус строится по наиболее актуальным данным Международного астрономического союза (полуоси равны 13000 м, 11400 м и 9100 м). Кроме того, на глобус наносится фотомозаика высокого пространственного разрешения, в то время как на предыдущие модели наносилась отмывка рельефа

Материалы и методы

Внеземное картографирование и моделирование небесных тел невозможно без изучения информации о картографических системах отсчета (системе широт, долгот и высот).

В 1919 году в Брюсселе был основан Международный астрономический союз (МАС) – организация, объединяющая астрономические сообщества всего мира. Каждые 2–3 года рабочая группа по картографическим координатным системам при МАС выпускает отчет, в котором собраны рекомендации по картографированию планет, спутников и малых тел Солнечной системы.

Для объекта исследования – Фобоса, по данным МАС оптимальной референц-поверхностью является именно трехосный эллипсоид, у которого большая экваториальная полуось равняется 13 км, малая – 11,4 км, полярная – 9,1 км [Report…, 2015].

Согласно рекомендациям, представленным в отчете, для Фобоса долготы отсчитываются от 0° до 360° на запад от главного меридиана. Широты отсчитываются в диапазоне от 0° до ±90° к северу и югу от экватора (рисунок 1).

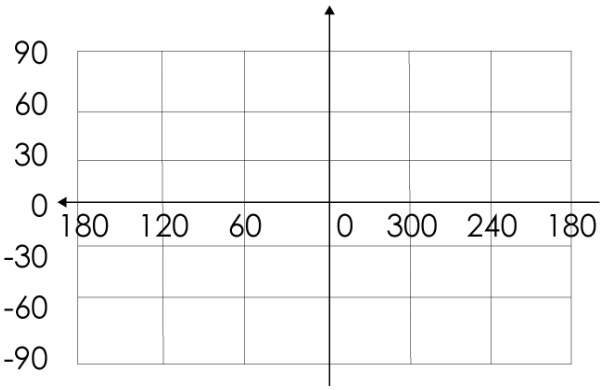


Рисунок 1 – Направление отсчета долгот для Фобоса

Остановимся на материалах, используемых в исследовании. В первую очередь – это набор данных, представленный на сервисе *Stooke Small Bodies Maps* [Stooke…]. В него входят карты и фотомозаики малых тел Солнечной системы, подготовленные профессором Ф. Стуком из Университета Западного Онтарио. Одна из мозаик, относящихся к Фобосу, первоначально полу-

чена с помощью съемочных систем космического аппарата *Viking*. Далее путем компиляции исходной мозаики с новыми изображениями, полученными съемочными системами *Mars Global Surveyor, Mars Express* и *Mars Reconnaisance Orbiter* было проведено ее уточнение. На данный момент достигнуто разрешение 40 пикселей в градусе. Фотомозаика составлена в квадратной цилиндрической проекции сферы.

Кроме фотомозаики для модели Фобоса в форме трехосного эллипсоида были использованы названия форм рельефа с координатной привязкой. Источником информации об их положении и правильном написании на латинице послужил планетарный газеттир [Gazetteer…].

Обозначим программные инструменты, используемые в работе. Их можно разделить на две группы, первая из которых позволяет работать с изображением на плоскости, а вторая в пространстве.

В первую очередь необходимо отметить узконаправленный продукт – программа построения сетки, который был разработан в Центре Геоинформационных исследований Института Географии РАН.

При работе с фотомозаикой использовался программный продукт *G.Projector-WIN*. Данное программное обеспечение (ПО) применяется для трансформирования изображений в заданную проекцию сферы. Также программа позволяет с заданным шагом сгенерировать сетку параллелей и меридианов, наложенную на перепроецируемое изображение, что было использовано в работе.

Основными ГИС-пакетами являются *QGIS Desktop* и *ArcGIS Desktop (ArcMap)*. В них проводилась привязка растровых изображений, интеграция названий на кириллице и латинице и предварительное оформление изображения, которое впоследствии будет нанесено на глобус.

В качестве вспомогательных программных продуктов использовались *Adobe Photoshop* и *Adobe Illustrator* – растровый и векторный графические редакторы.

Ко второй группе относятся программные продукты трехмерного моделирования. В процессе создания трехмерной модели в виде глобуса основным ПО данной тематики являлся *Blender 1.74*. *Blender* – профессиональное свободное и открытое программное обеспечение для создания трехмерной компьютерной графики.

Весь процесс создания модели Фобоса можно также разбить на две группы процессов, первая – работа с изображением на плоскости, вторая – работа с трехмерной визуализацией небесного тела и вспомогательных элементов.

Рассмотрим первую группу процессов. Перед непосредственным перепроецированием фотомозаики в требуемую проекцию, производится построение сетки параллелей и меридианов для проекций трехосного эллипсоида с заданными параметрами. Сетка на четыре полушария строится шагом в 10° (рисунок 2).

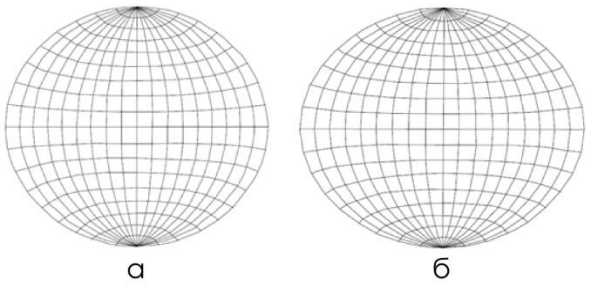


Рисунок 2 – Сетка параллелей и меридианов для полушарий с осевым меридианом а) 0° и 180°, б) 90° и 270°

Узлы сетки используются для дальнейшего перепроецирования фотомозаики в необходимую проекцию. При этом выбор положения начального меридиана картографируемого тела и направление отсчета долгот устанавливается согласно рекомендациям МАС.

Далее необходимо перепроецировать исходное изображение из квадратной цилиндрической проекции сферы в поперечную азимутальную проекцию трехосного

эллипсоида. Изначально изображение представлено на всю поверхность сферы без разделения на полушария и имеет прямоугольную форму. Итоговые же изображения на плоскости должны быть представлены в виде эллипсов, отражающих отдельные полушария.

Для решения поставленной задачи привлекается программа *G.ProgectorWIN*, в которой исходная фотомозаика из квадратной цилиндрической проекции перепроецируется в азимутальную поперечную равнопромежуточную проекцию сферы. Поочередно выставляются четыре необходимых осевых меридиана, в результате создается восемь изображений, четыре из которых без сетки параллелей и меридианов, четыре с наложенной сеткой.

Далее, в окно проекта *QGIS* загружаются полученные на первом шаге точки. В первую очередь происходит обработка полушарий с осевыми меридианами 0° и 180°. А затем аналогичные действия проводятся для двух оставшихся полушарий. В окно привязки растров загружается изображение полушария с осевым меридианом 0° в азимутальной проекции сферы с сеткой. С помощью инструмента расстановки опорных точек расставляются 360 точек привязки таким образом, чтобы точки пересечения сетки на изображении были соотнесены с аналогичными им точками в окне проекта QGIS. Таким образом проводится сопоставление точек в азимутальной проекции для сферы с точками в азимутальной проекции трехосного эллипсоида с заданными параметрами. Полученные в окне привязки растров точки сохраняются в формате *POINTS*. Далее поочередно загружаются фотомозаики полушарий в азимутальной проекции сферы без сетки с осевым меридианом 0° и 180°. В окно привязки растров добавляются сохраненные ранее точки.

В результате выполнения данного этапа работы создаются четыре перепроецированные в итоговую проекцию фотомозаики (рисунок 3).

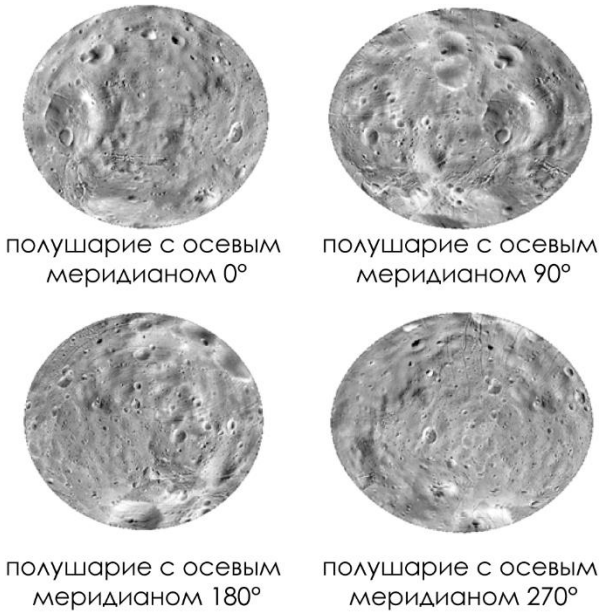


Рисунок 3 – Фотомозаика на отдельные полушария

Далее в виде аннотаций карты наносятся названия форм рельефа на латинице и кириллице. Причем учитывается, что далее будет создана «развертка», а, соответственно, формы рельефа, которые отражаются на нескольких фотомозаиках должны быть подписаны один раз, а надписи не должны пересекать меридианы, которые будут являться граничными при нанесении на глобус. Именно из-за указанных требований было принято решение генерировать надписи в виде аннотаций, а не стандартными инструментами нанесения надписей в ГИС-пакетах. Данный шаг реализуется в программном обеспечение *ArcGIS* (*ArcMap*). Полученные в каждом проекте изображения сохраняются в формате PNG.

Все полученные изображения добавляются в проекты в ПО Adobe Photoshop. Каждое из четырех полушарий переносится в общий документ и располагается в соответствии с рекомендациями Международного астрономического союза (крайнее левое изображение – полушарие с осевым меридианом 270°, а крайнее правое – полуша-

рие с осевым меридианом 0°). В проект добавляются подписи сетки таким образом, чтобы был подписан каждый третий меридиан, а на одном из четырех полушарий была нанесена информация о широте, также через 30°. Полученное изображение сохраняется в формате PNG с разрешением 400 *ppi*. Таким образом создается итоговое изображение на плоскости (рисунок 4).

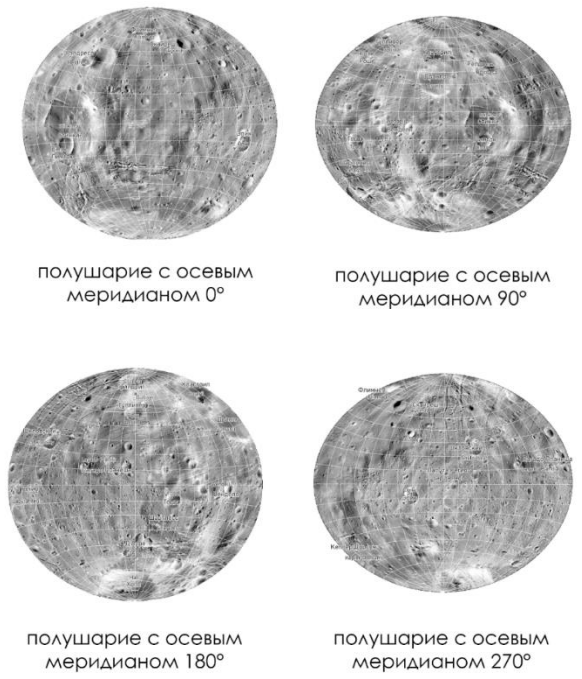


Рисунок 4 – Полученное изображение на плоскости

Дальнейшая работа производится в редакторе трехмерных объектов – *Blender*. В проект добавляется окружность, располагающаяся в плоскости *XY*, для нее настраивается диаметр, а также положение центра в точке с координатами (0, 0, 0). К полученному элементу последовательно применяются инструменты экструдирования и изменения размера, что позволяет получить объемную подставку для глобуса.

На следующем шаге в проект добавляется дуга, повторяющая своими очертаниями трехосный эллипсоид. Далее в проект добавляется цилиндр – ось вращения глобуса. Его центр располагается в точке с координатами (0, 0, 1), по оси *Z* фигура вытягивается таким образом, чтобы ее верхний край возвышался над верхним краем дуги, сгенерированной ранее. Размер диаметра цилиндра – 0,1 условных единиц. Инструментами выдавливания и изменения размера телу придается художественная форма.

Заключительным шагом на этапе подготовки является создание трехосного эллипсоида. Изначально в проект добавляется сфера, для которой устанавливается количество граней: 36 по горизонтали и 18 по вертикали (для дальнейшего однозначного сопоставления с сеткой координат на плоском изображении). Центр сферы размещается в точке с координатами (0,0,3), то есть таким образом, чтобы он находился на оси вращения на одинаковом удалении от верхнего и нижнего внутренних краев дуги. К сфере применяется масштабирование таким образом, чтобы по оси *X* ее диаметр составлял 1,3, по оси *Y* – 1,14, по оси *Z* – 0,91 условных единиц. Оси настраиваются в соответствии с размерами трехосного эллипсоида, аппроксимирующего Фобос в соответствии с рекомендациями МАС. Для всех тел, добавленных в проект, настраивается сглаживание (рисунок 5).

Следующим шагом моделирования является нанесение текстур на все созданные тела. Для элементов подставки используется текстура дерева. В панели *Node Editing* производится настройка визуализации (рисунок 6).

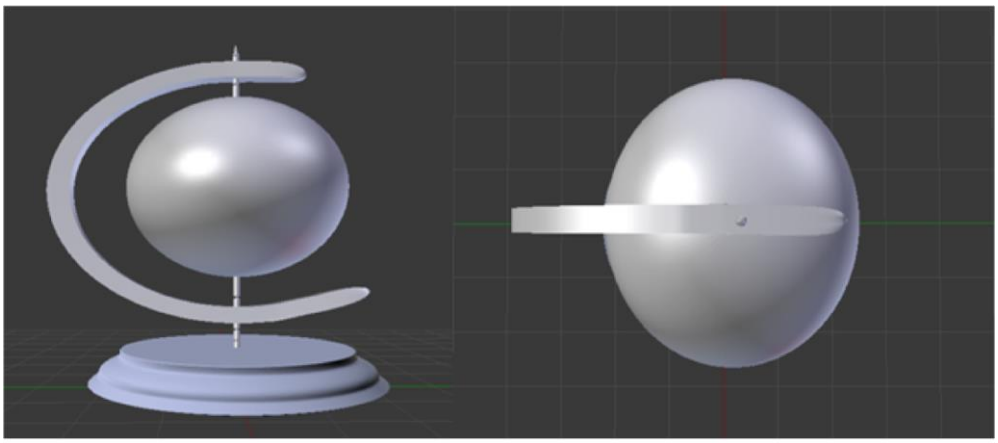


Рисунок 5 – Результат подготовительного этапа при трехмерном моделировании: а) сбоку, б) сверху

В режиме редактирования объектов производится выбор способа нанесения текстуры на объемную фигуру – *Project From View*, который позволяет нанести текстуру реального объекта на трехмерную фигуру с незначительным искажением в удалении от взгляда наблюдателя. Для трехосного эллипсоида в проект добавляется полученное ранее изображение четырех полушарий, аналогично описанному выше алгоритму производится настройка в панели *Node Editing*. Процесс нанесения текстуры на данную фигуру отличается от описанного выше на этапе выбора проекции. Для нее выбирается способ *Unwrap*, то есть «развертывание». Поочередно производится выделение граней эллипсоида (девять граней для каждого полушария).

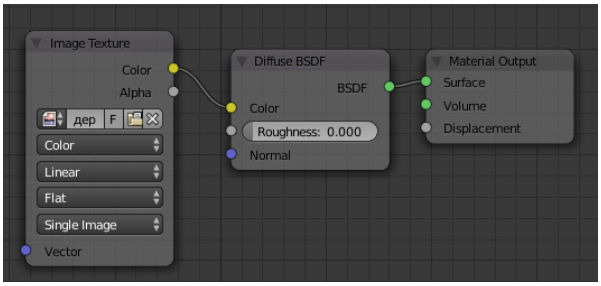


Рисунок 6 – Рабочее окно панели *Node Editing*

На рисунке 7 схематически представлены меридианы, ограничивающие развертку для каждого из полушарий.

Для каждого выделенного полушария в окне *UV/Image Editor* производится сопоставление узла сетки на объемной фигуре с узлами сетки, нанесенной на плоское изображение (рисунок 8).

Рисунок 7 – Развертка по меридианам для каждого из полушарий

Необходимо отметить, что в местах стыка разверток необходимо проследить за тем, чтобы толщина линии приблизительно соответствовала остальным меридианам. Также трудным для визуализации местом являются полюса, на которых сходятся все развертки.

Далее необходимо обеспечить визуальное представление полученного глобуса. Из-за трехмерности фигуры было принято решение показать глобус в формате видео. Для корректной визуализации в первую очередь необходимо настроить анимацию глобуса. Анимацию необходимо настроить покадрово. Значение кадровой частоты (*fps*) устанавливается равным 24 кадрам в секунду, всего генерируется 720 кадров (два кадра на один градус поворота), таким образом видео занимает 30 секунд. Далее проводится покадровый рендеринг, то есть

создание цифрового растрового изображения по разработанной *3D*-сцене для каждого из 720 кадров.

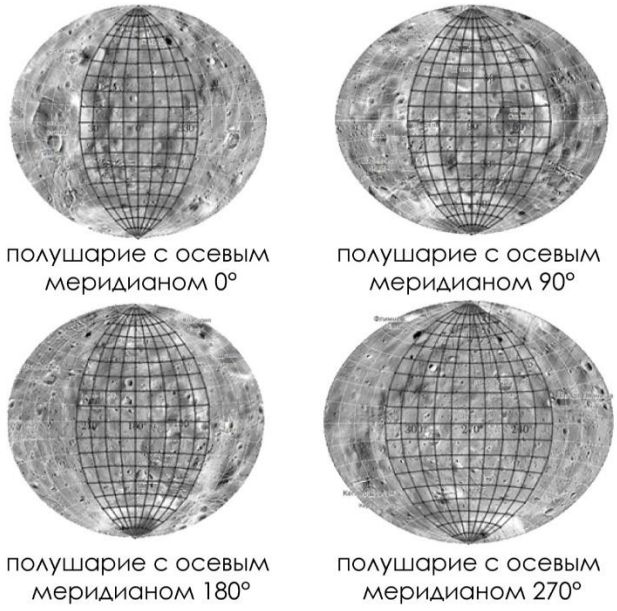


Рисунок 8 – Создание развертки

На заключительном этапе из полученных изображений «собирается» видеопрезентация трехмерной модели Фобоса на трехосном эллипсоиде.

Результаты

В результате выполнения данной работы был создана модель Фобоса в форме трехосного эллипсоида с нанесенной фотомозаикой (рисунок 9).

Трехмерная визуализация позволяет сохранить геометрическое подобие контуров и соотношение площадей на модели и на реальном теле, а, соответственно, отражает поверхность с существенно меньшими искажениями по сравнению с изображением на плоскости. Кроме того, на глобусе поверхность отображается без разрывов, что облегчает визуальный анализ.

Отрицательной чертой полученного глобуса является то, что граничные на стыке меридианы, практически не отражаются на глобусе. Причина заключается в том, что координатная сетка строилась по узлам, сгенерированным с шагом 1°, в то время как перепроецирование в зональную проекцию производилось по узлам, сгенерированным с шагом 10°.

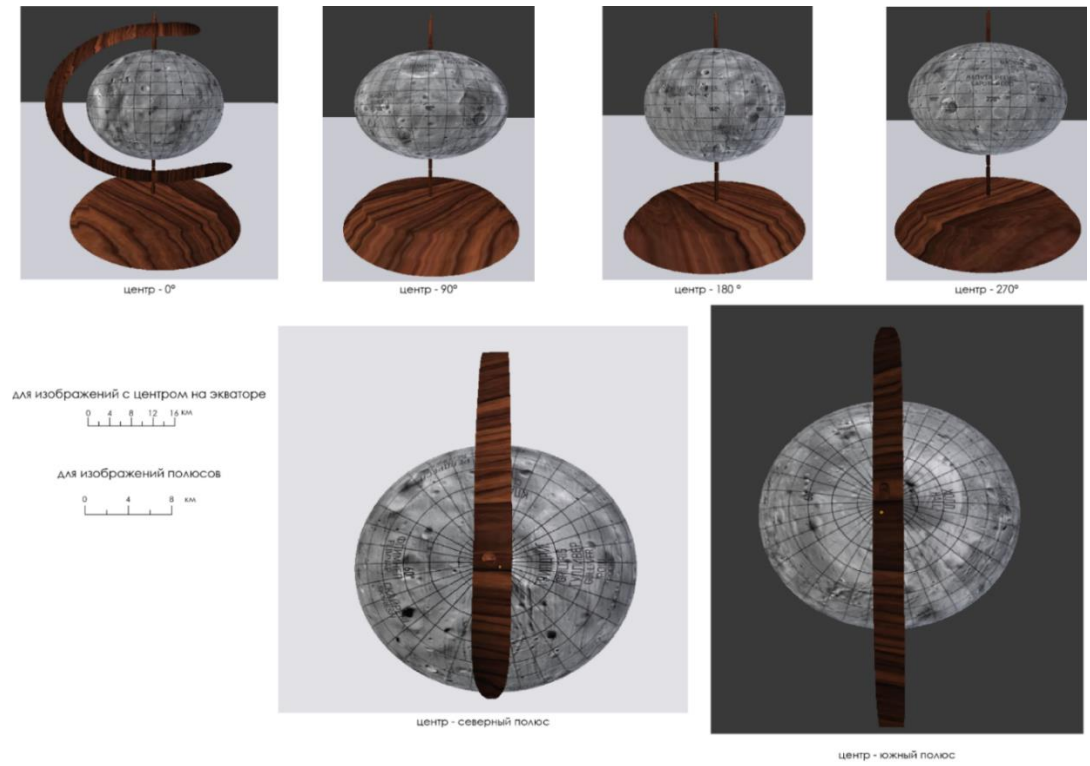


Рисунок 9 – Созданный глобус

Данной особенности моделирования

можно избежать, увеличив количество граней на создающейся основе для глобуса, или увеличив шаг при генерации сетки. Однако первый вариант приведет к существенному увеличению времени моделирования, а второй – к потере плавности линий сетки.

Выводы

В результате работы по трехмерному моделированию Фобоса был построен глобус, на который наносилась современная фотомозаика высокого пространственного разрешения. Преимуществом разработанного алгоритма глобусного моделирования является его универсальность. Данная технология позволяет наносить на референц-поверхность различную тематическую информацию. Особенности обработки могут наблюдаться исключительно на этапе предварительной подготовки, и будут зависеть от проекции, в которой изначально представлены данные. Кроме того, алгоритм может быть применен для любого по форме тела, референц-поверхностью которого является шар, эллипсоид вращения или трехосный эллипсоид.

Также стоит упомянуть, что программное обеспечение (Blender), в котором производится трехмерное моделирование, является полностью открытым и бесплатным. Однако эта особенность несет в себе ряд ограничений. Например, Blender не позволяет экспортировать модель с нанесенными текстурами. Исходя из этого, было принято решение представить глобус с помощью видеопрезентации, а также в виде физической модели с нанесенной фотомозаикой.

Список литературы

А.с. 1730661 A1 СССР, МПК G09B 27/00. Способ изготовления модели небесного тела / Л. М. Бугаевский, Б. В. Краснопевцева, К. Б. Шингарева. – 4758437: заявлено 10.11.1989; опубл. 30.04.1992, – 3 с.

История лаборатории (Комплексная лаборатория исследования внеземных территорий). [Электронный ресурс] URL: http://miigaik.ru/mexlab/laboratory-history/, (дата обращения: 10.11.2022).

Gazetteer of Planetary Nomenclature. [Электронный ресурс] URL: https://planetarynames.wr.usgs.gov/SearchResults(дата обращения: 02.11.2022).

Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2015// Archinal B.A. et al. – Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, Vol. 130. – Is. 3. 22, – 46 pp.

Stooke Small Bodies Maps. [Электронный ресурс] URL: https://sbnarchive.psi.edu/pds3/multi_mission/MULTI_SA_MULTI_6_STOOKEMAPS_V3_0/document/00_map_guide.html (дата обращения: 02.11.2022).

Wählisch M., Stooke P.J., Karachevtseva I.P., Phobos and Deimos cartography. / M. Wählisch, P.J. Stooke, I.P. Karachevtseva // Journal Planetary and Space Science. – 2014. – No 102. – pp. 60 – 73.

Сведения об авторах

Мария Владимировна Михайлова – студентка 1 курса магистратуры кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Максим Валерьевич Ныpцов – профессор кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, доктор технических наук, профессор РАН.

Совершенствование методики интерполяции высот горизонталей для расчета морфометрических величин

Мурман А.С., Энтин А.Л.

Создание цифровых моделей рельефа (ЦМР) по исходных данным, представленным в виде изолиний (например, горизонталей с топографических карт), требует применения специальных комплексных методов интерполяции. Один из таких методов – МАГ, разработанный на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ. Метод МАГ позволяет получать достоверные ЦМР, но результат интерполяции характеризуется рядом артефактов. Наиболее заметные из них – локальные искажения высот на концах незамкнутых изолиний (например, полугоризонталей). В статье представлена методика, позволяющая подготовить исходные данные для создания ЦМР с помощью метода МАГ и избежать появления артефактов на концах полугоризонталей. Методика состоит в продлении полугоризонталей за пределами области моделирования или до участков с высокой плотностью исходных данных. Для построения продлеваемых полугоризонталей используется разница двух минимальных евклидовых расстояний основных горизонталей. Полученный растр переводится в векторный формат, после чего удаляются ненужные сегменты, а оставшиеся соединяются с исходными полугоризонталями. Методика была протестирована на трех ключевых участках, для которых были созданы ЦМР и рассчитаны производные параметры. Установлено, что при интерполяции по дополненным данным артефакты на прежних местах отсутствуют.

Ключевые слова: ЦМР, МАГ, Surfer, морфометрические величины, интерполяция, артефакты, предварительная обработка

Improving the method of interpolation of contour heights to calculate morphometric values

Murman A.S., Entin A.L.

The creation of digital elevation models (DEMs) from isolinear input data (e. g. contours from topographic maps) requires special interpolation methods. Among these methods is MAG, developed by the Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, MSU. MAG allows creating reliable DEMs, but the interpolation result is characterized by several artifacts. The most conspicuous artifacts are aligned to the endpoints of the non-closed lines (i. e. additional contours). The article presents a technique that allows to prepare data for DEM creation with the MAG method. It is necessary to avoid the appearance of artifacts at the ends of supplementary contours. The technique prolongs supplementary contours beyond the modelling area borders or to areas with high input data density. To construct the prolongated contours, the difference between the two minimum Euclidean distances of the main contours is used. The resulting raster is converted into a vector format, after which unnecessary segments are removed, and the remaining ones are connected to the original supplementary contours. The technique was tested within three key areas. For each of them DEMs were created, and derived parameters were calculated. It was established that results of interpolation by new data contain no artifacts in previous places.

Keywords: DEM, MAG, Surfer, derived parameters, interpolation, artifacts, preprocessing

Введение

Рельеф – важный компонент ландшафта, перераспределяющий потоки вещества и энергии и выступающий в качестве

фактора-ретранслятора тепла и влаги. Цифровые модели рельефа (ЦМР) позволяют получить подробную информацию о местности, осуществлять расчет производных показателей. В качестве информации о высотах местности часто используются горизонтали, оцифрованные с крупномасштабных топографических карт. Два наиболее используемых на практике метода интерполяции – ANUDEM (реализовано в ArcGIS) и МАГ (реализовано в Surfer). В ANUDEM ЦМР создается за счет итеративной сплайн-интерполяции на основе большого количества нерегулярно расположенных точек высот и данных по линиям тока [Hutchinson, 1989, Hutchinson et. al., 2011]. Метод МАГ основан на вычислении расстояний до двух ближайших изолиний и кусочно-линейной интерполяции. Изолинии при таком подходе интерпретируются как векторные объекты [Кошель, 2005].

Опытным путем было установлено, что артефакты интерполяции возникают при использовании любого из этих методов. В случае ANUDEM они проявляются в менее корректном отображении местности внутри замкнутых изолиний, в то время как у МАГ артефакты возникают в окрестностях конечных узлов изолиний. Об этом пишет автор метода [Кошель, 2005], указывая, что изолинии либо должны быть замкнутыми, либо их концы должны находиться за пределами области моделирования, однако это не всегда соблюдается.

Существуют подходы, позволяющие подготавливать исходные данные путем создания или продления полугоризонталей. В частности, метод [Gousie et al., 2003] предлагает создание полугоризонталей путем поиска самого короткого отрезка линии, соединяющего точки на двух соседних изолиниях с разными высотами. В еще одной работе [Samsonov et al., 2019] рассматриваются принципы картографического дизайна для выбора полугоризонталей топографических карт и предлагается автоматизированный метод их размещения. Результаты автоматизированного метода показывают высокое сходство с результатом ручного размещения полугоризонталей. Опыт указанных работ не вполне релевантен рассматриваемой задаче. В данном случае необходимо не просто создать полугоризонтали на некоторых участках, но и продлить существующие за границы области моделирования. В этой связи предложена методика, позволяющая учесть все нюансы.

Материалы и методы

Ключевой участок, на котором производилось тестирование алгоритмов и типизация артефактов интерполяции, расположен в западной части Тамбовской области в пределах Окско-Донской низменности. В качестве входных данных использовались горизонтали, оцифрованные с крупномасштабных топографических карт (масштаб 1:10 000). Высота сечения рельефа составляет 2,5 м.

Появление артефактов на ЦМР и на производных моделях обусловлено особенностями работы методов интерполяции. При этом сами методы относительно трудны для модификации. В связи с этим было принято решение создать алгоритм, позволяющий подготовить исходные данные для моделирования методом МАГ: достроить полугоризонтали до замкнутых изолиний, опираясь на рисунок и положение соседних горизонталей. В таком случае проблема с артефактами на концах изолиний может быть преодолена, поскольку исходный набор данных будет модифицирован таким образом, что он будет соответствовать требованиям метода.

Методика продления полугоризонталей

Методика состоит из трех этапов: 1) создание растра срединных линий; 2) конвертация полученных линий в векторный формат; 3) удаление ненужных сегментов, соединение с исходными полугоризонталями.

В качестве платформы был использован ArcGIS; алгоритм реализован на языке программирования Python версии 2.7 с использованием возможностей библиотеки ArcPy.

Создание растра срединных линий

Для начала работы самого алгоритма необходимо определить положение продлеваемых сегментов полугоризонталей – далее для избежания путаницы будем называть их срединными линиями. Фактически срединная линия – это линия, в каждой точке которой равны расстояния до двух ближайших изолиний разной высоты. Для того, чтобы определить положения срединных линий, производится построение растров евклидовых расстояний, причем это делается поочередно для каждого высотного уровня основных горизонталей. Из множества полученных расстояний для каждой точки местности (точнее, для каждой ячейки регулярной сетки) необходимо выбрать два наименьших. Фактически, для экономии места на диске, все множество расстояний не хранится, а найденные значения перезаписываются «на лету». В результате выполнения этой операции для всех ячеек получаются 2 массива с минимальными значениями евклидового расстояния (наименьшим и следующим за ним) до соседних горизонталей.

На следующем шаге необходимо найти разность между первым и вторым растрами минимальных значений евклидового расстояния. Ячейки со значениями разности, близкими к нулю, укажут положение срединных линий.

Из полученного растра разности выбираются значения, которые позволяют составить непрерывные линии срединных линий. После серии экспериментов было установлено, что при размере ячейки растров расстояний, равном 3 м, все значения разности от 0 до 5 (по модулю) будут относиться к срединной линии. Это примерно соответствует двум размерам ячейки. Остальным ячейкам присваивается значение «нет данных».

Конвертация растра срединных линий в векторный формат

Полученные участки растра имеют относительно большую ширину (больше одной ячейки), поэтому непосредственно конвертировать их в векторный формат нельзя. Сначала необходимо провести операцию утончения линий – она выполняется с помощью инструмента Thin из набора Spatial Analyst [Утончение]. После применения этого инструмента толщина линий не превышает одной ячейки, и их можно конвертировать в полилинии. К созданным полилиниям применяются процедуры сглаживания и упрощения геометрии Smooth и Simplify Line [Сгладить линию], [Упростить линию]. В параметрах инструмента Simplify Line выбран метод "BEND_SIMPLIFY", который заключается в сохранении критических изгибов. Допуск представляет собой диаметр окружности, приближенный к изгибу изолинии. Этот параметр составил 25 м. У инструмента Smooth использован метод полиномиальной аппроксимации с использованием экспоненциального ядра. Допуск необходим для расчета местоположения новых вершин и определения сдвига кривой. Чем меньше это параметр, тем больше деталей будет сохранено. В настоящем случае значения допуска составило 5 м.

Удаление ненужных сегментов срединных линий и соединение с исходными полугоризонталями

После создания срединных линий необходимо выбрать те из них, которые соответствуют исходным полугоризонталям и при этом не дублируют их. Кроме того, нас интересуют не все сегменты срединных линий: необходимо убрать их в тех местах, где плотность изолиний и так высока (например, на крутых склонах). Этот шаг объясняется тем, что такие сегменты не улучшают

качество построения ЦМР.

Первая задача решается с помощью выборки по пространственному положению: выбираются только те сегменты срединных линий, которые пересекаются с исходными полугоризонталями.

Чтобы соединить полученные средние линии с исходными полугоризонталями, нужно определить, в каких точках они будут пересекаться. Эта задача была решена с помощью инструмента Intersect [Пересечение]. Для сохранения информации о высотах изолиний в параметрах инструмента все атрибуты из входных объектов будут перенесены в выходной класс объектов. В результате был получен набор точек, определяющий места, в которых пересекаются эти два набора данных (рисунок 1).

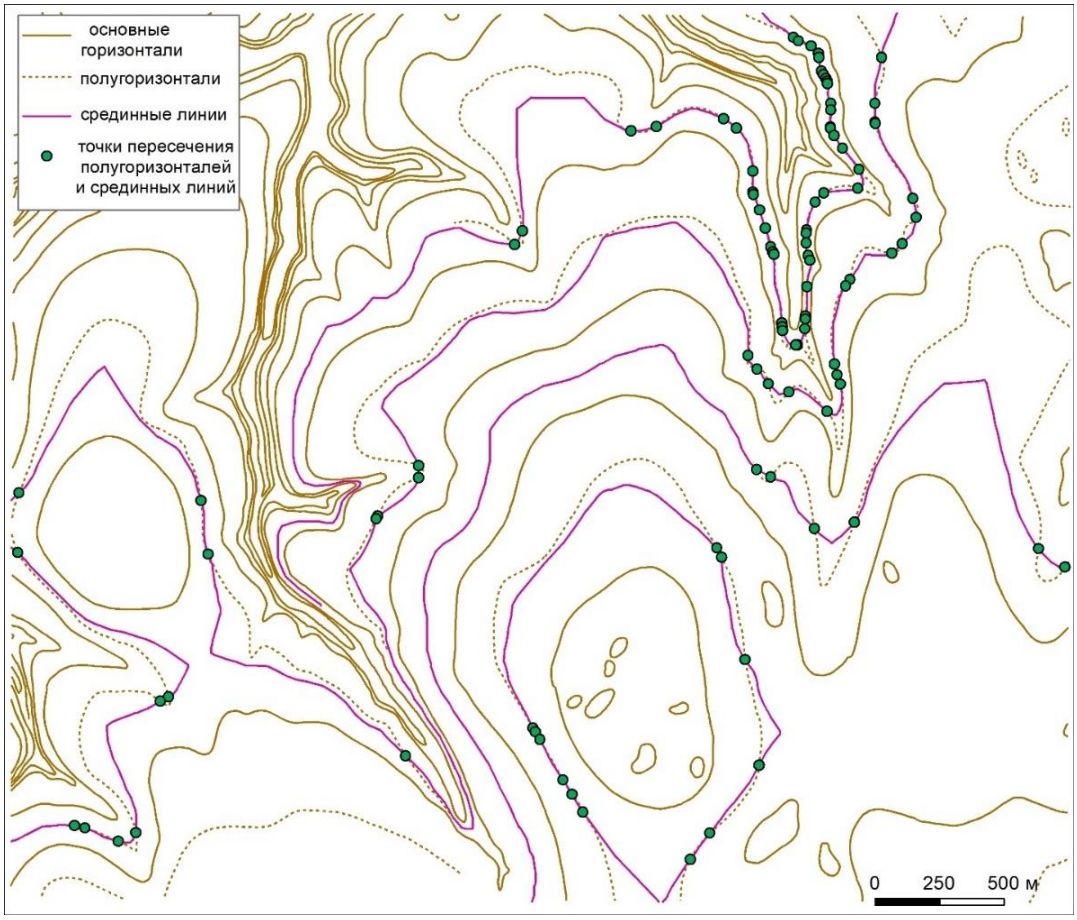


Рисунок 1 – Фрагмент тестового участка после пересечения срединных линий и исходных полугоризонталей. Точками обозначены места пересечения этих наборов данных

На этом же этапе производится присвоение высот срединным линиям с помощью пространственного соединения атрибутов срединных линий и точек их пересечения с полугоризонталями, в которых присутствует информация о высотах [Пространственное …]. На выходе получены разрезанные по точкам срединные линии, у которых известна абсолютная высота.

Далее необходимо выбрать те сегменты, которые будут выступать как продолжение полугоризонталей, и убрать лишние. Подходящие срединные линии будут отвечать следующему условию: если у прямой есть всего одна точка пересечения с исходной полугоризонталью, то такая линия будет рассматриваться как ее продолжение (рисунок 2а). Если точек две, то необходимо проанализировать идентификаторы полугоризонталей, которые записаны в ат-

рибутах точек. В случае, когда идентификаторы соответствуют одной и той же исходной горизонтали, сегмент средней линии можно исключить. Если идентификаторы полугоризонталей различаются, то сегмент средней линии, который они ограничивают, соединяет две разных линии полугоризонталей одной и той же высоты. На рисунке 2б видно, что со срединной линией в центре пересекаются две исходные полугоризонтали, у которых, очевидно, разные идентификаторы. В результате выполнения пересечения линий, эти сведения были сохранены.

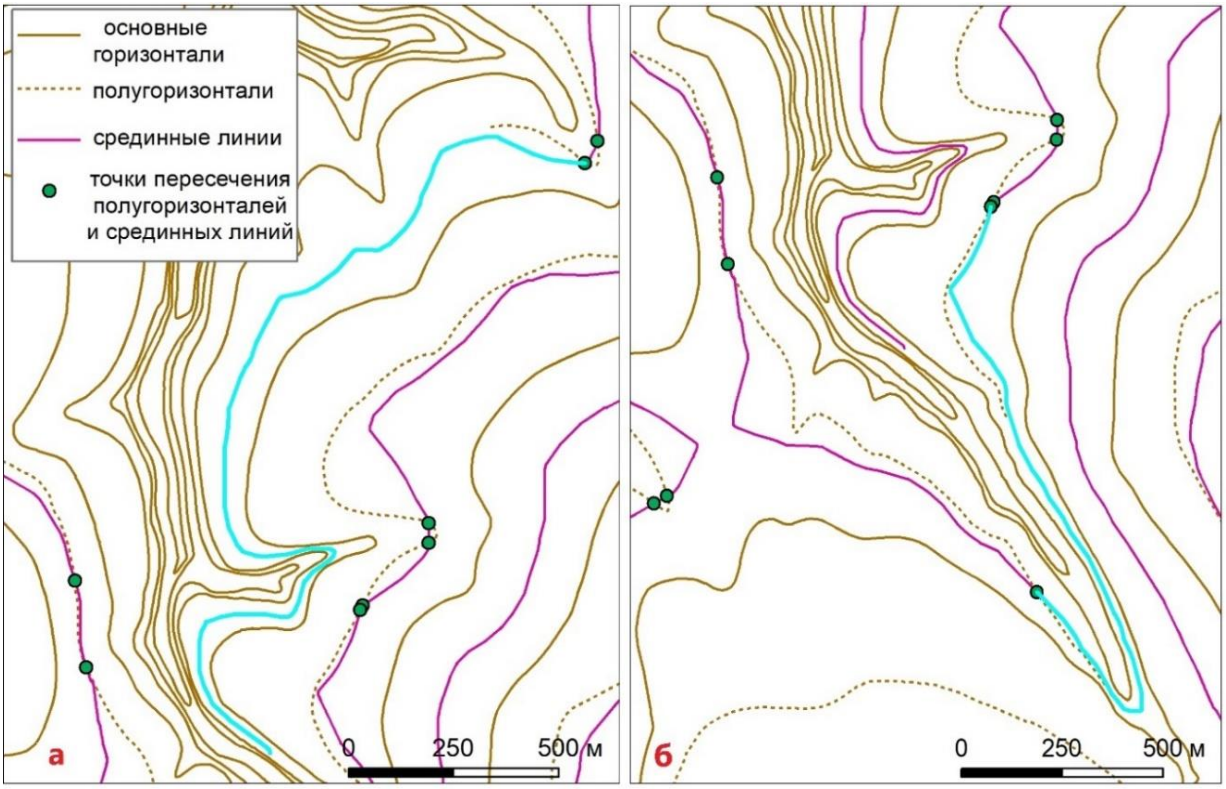


Рисунок 2 – Фрагменты обрезанных срединных линий: (а) – выделенная бирюзовым срединная линия ограничена одной точкой. Он пересекается с одной исходной полугоризонталью; (б) – сегмент срединной линии, ограниченный двумя точками. Он пересекается с двумя разными исходными полугоризонталями

Однако, если просто соединить полугоризонтали с отрезками срединных линий в точках пересечения, может получиться дублирование. Исходя из того, что мы принимаем положение исходных полугоризонталей достоверным, необходимо сохранить их полностью. Поэтому следует удалить сегменты срединных линий, дублирующих положение горизонталей. Для удаления сегментов использовалось построение полигонов Тиссена, соответствующих исходным основным горизонталям и полугоризонталям. Каждой вершине соответствует свой полигон, ограничивающий все ближайшие к ней точки (рисунок 3).

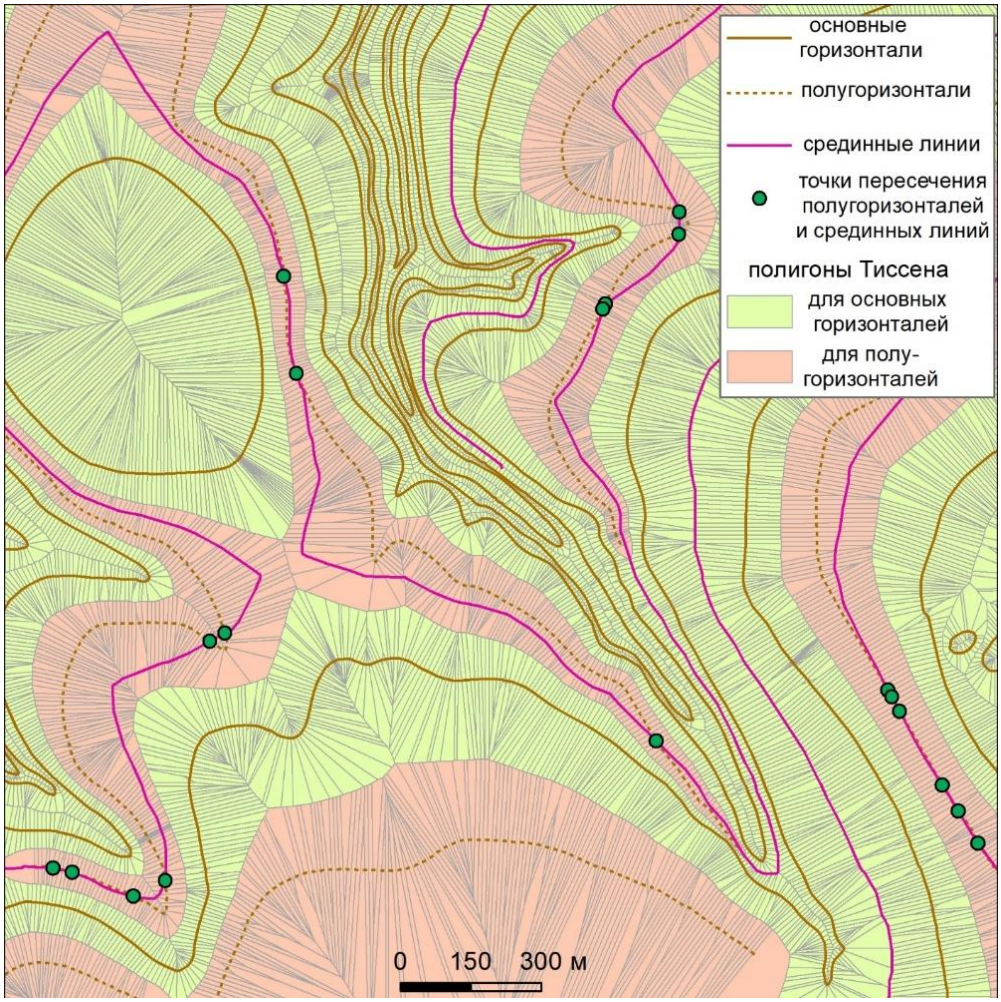


Рисунок 3 – Полигоны Тиссена узлов основных горизонталей или полугоризонталей

На полигонах Тиссена хорошо заметны области, оконтуривающие полугоризонтали. Все сегменты срединных линий, попадающие в полигоны Тиссена соответствующих полугоризонталей, удаляются.

После обрезки (рисунок 4) заметен небольшой разрыв между срединной линией и полугоризонталью, однако нахождение концов этих двух изолиний приблизительно на одной линии позволит соединить их под небольшим углом, т. е. сделать это как можно более «естественно».

В итоге необходимо присоединить обрезанные срединные линии к исходным полугоризонталям. Для этого сначала объединяем наборы данных срединных линий и исходных горизонталей, затем соединяем исходные и созданные сегменты, используя две ближайшие точки концов изолиний при условия попарного совпадения их идентификаторов. Условие объединения следующее: если у первой точки ближайшая – вторая, а у второй – первая (т. е. идентификаторы взаимно совпадают), то такие две точки подлежат объединению. Выходной формат горизонталей представлен shape-файлом. Результат работы можно увидеть на рисунке 5.

Результаты

Разработанная методика была опробована на трех наборах пространственных данных, представляющих горизонтали с топографических карт на территорию Тамбовской области. Выбор участков обусловлен тем, что территория на них характеризуется небольшим перепадом высот, в связи с чем присутствует заметное количество полугоризонталей.

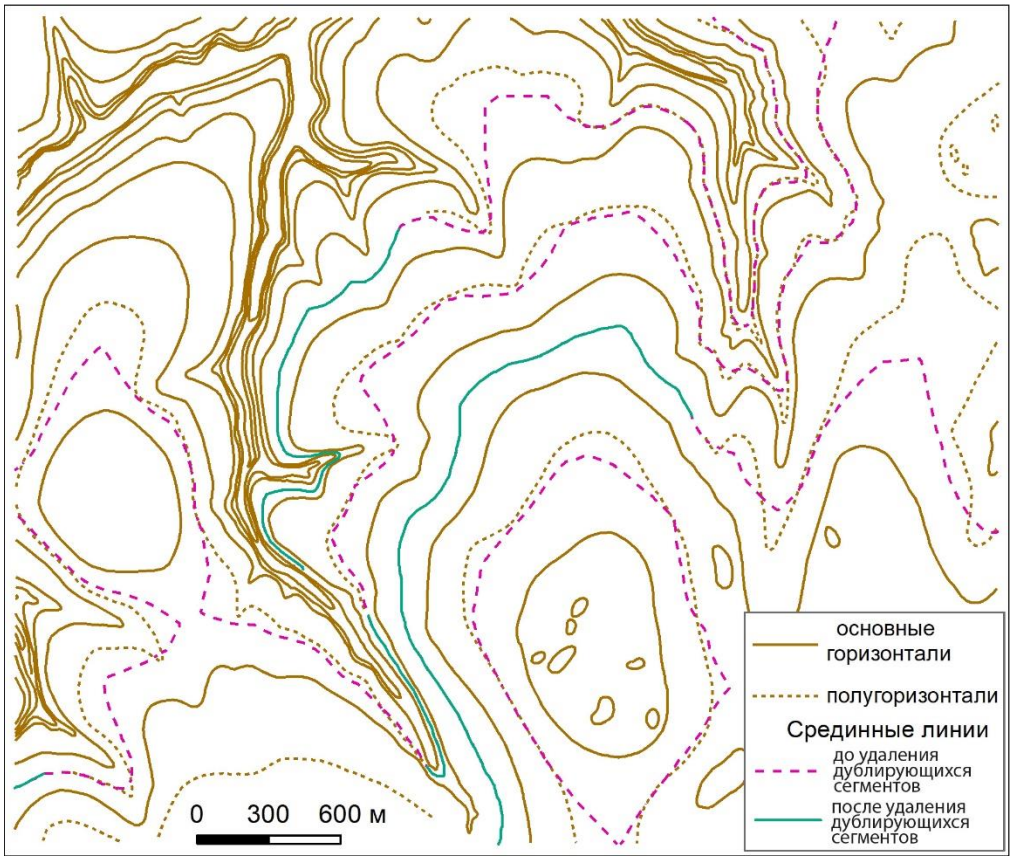


Рисунок 4 – Срединные линии после удаления дублирующихся сегментов по полигонам Тиссена

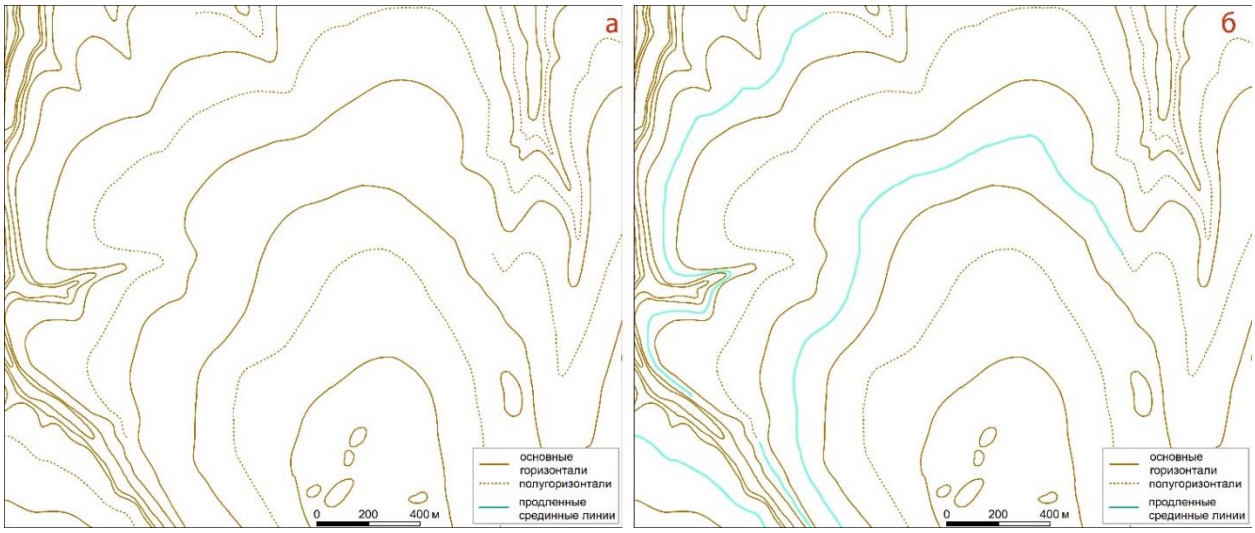


Рисунок 5 – (а) – горизонтали до использования алгоритма продления полугоризонталей, (б) – горизонтали после алгоритма

Были достроены полугоризонтали и созданы цифровые модели рельефа методом МАГ, на основе которых рассчитывались производные величины: крутизна склонов, экспозиция, горизонтальная (плановая), вертикальная (профильная) кривизны. Для ЦМР и морфометрических величин размер ячейки составил 15 м. В качестве примера рассмотрим один из участков (рисунок 6).

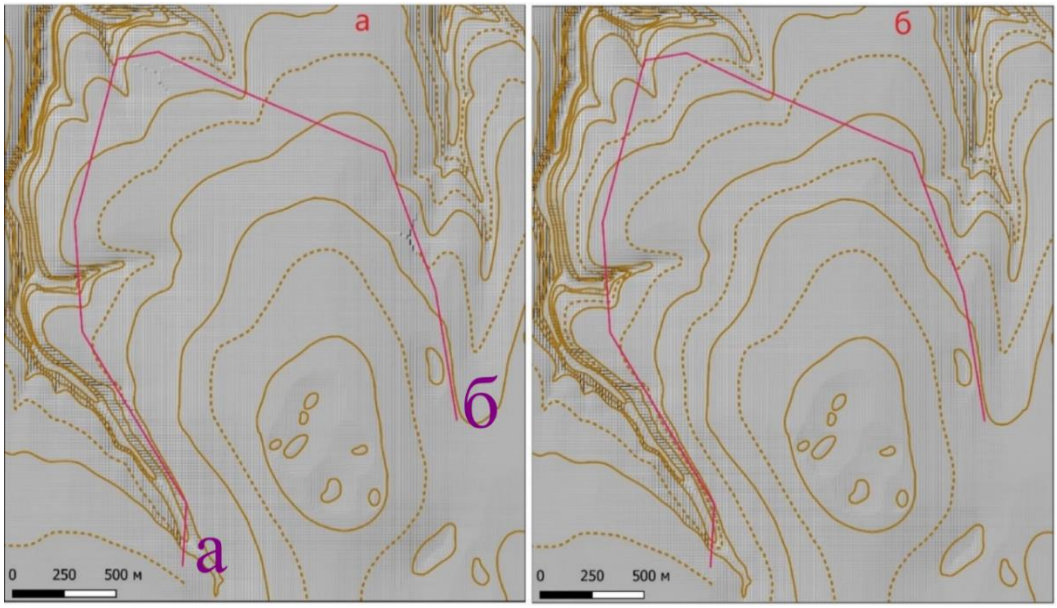


Рисунок 6 – ЦМР ключевых участков: а – ЦМР по исходным горизонталям; б – ЦМР по дополненным горизонталям

ЦМР, построенная по исходным данным, отличается большим количеством артефактов, которые выражаются в разбросе высот до 130 м. На концах полугоризонталей сосредоточены основные артефакты – скачки значений высоты. Средний разброс этого показателя в пределах артефактов составляет 0,5 м (рисунок 7).

Рисунок 7 – Профили по ЦМР

Артефакты на растрах крутизны проявляются в увеличении размаха значений на концах полугоризонталей. Отклонения могут достигать 4°, что существенно при анализе территории с точки зрения эрозионной активности и перемещений потоков веществ. В то же время на данных с продленными горизонталями артефактов на прежних местах не наблюдается (рисунок 8).

Горизонтальная кривизна обозначает участки конвергенции (вогнутые области) и

Рисунок 8 – Профили по значениям крутизны

дивергенции (выпуклые). На концах полугоризонталей фиксируется их чередование, не соответствующее действительности (артефакт), которое существенно выбивается за пределы реальных значений. Более того, в пределах артефактов не просто увеличиваются по модулю значения горизонтальной кривизны, делая эти области сильно выраженными, но и часто меняется знак. Растры, полученные после достраивания полугоризонталей, лишены таких резких изменений и выглядят более правдоподобно. Число резких пиков, в том числе с изменением знака кривизны, на профиле также уменьшается (рисунок 9).

Рисунок 9 – Профиль по значениям горизонтальной кривизны

Вертикальная кривизна маркирует области увеличения и замедления скорости потоков. Артефакты сильно повлияли на значения и привели к тому, что возникли ложные области ускорения (положительный знак) и замедления (отрицательный знак) потоков там, где их не существует в действительности. В среднем значения в пределах артефактов превышают реальные в три раза как в большую, так и меньшую стороны. На данных, полученных в результате тестирования методики, артефакты на прежних местах не были выявлены (рисунок 10).

Рисунок 10 – Профиль по значениям вертикальной кривизны

Обсуждение

Созданная методика продления полугоризонталей позволяет исключить возникновение артефактов интерполяции с использованием алгоритма МАГ на ЦМР и поверхностях производных локальных морфометрических характеристик в тех местах, где ранее полугоризонтали обрывались. Поскольку было установлено, что основной массив артефактов в работе МАГ связан именно с концами полугоризонталей, работа была сосредоточена конкретно на этой задаче. На нескольких ключевых участках был протестирован разработанный способ. Было показано, что он позволяет предотвратить возникающие ранее артефакты и сделать значения правдоподобными. Алгоритм решает поставленную задачу продления полугоризонталей и работает в среде ArcGIS. С одной стороны, это преимущество, поскольку в данной среде обеспечивается стабильность и производительность, а с другой стороны – недостаток, так как ArcGIS относится к проприетарному ПО. Следует также оговорить ограничения разработанной реализации алгоритма:

Предложенный алгоритм предназначен для решения узкой задачи – устранение артефактов при интерполяции высот методом МАГ, возникающих на концах полугоризонталей, путем их достроения. Поэтому артефакты, появляющиеся по другим причинам, не устраняются этим алгоритмом.

Ресурсозатратность

Запуск алгоритма для большой территории требует большого объема памяти для создания растров евклидовых расстояний.

При создании полигонов Тиссена в качестве входных данных используются точки – узлы всех исходных горизонталей. Однако иногда для работы инструмента не хватает данных о положении срединных линий, что приводит к возникновению пересечения их с горизонталями. Теоретически данную проблему можно решить, уменьшив размер ячейки на этапе расчета евклидовых расстояний, однако это еще больше увеличит ресурсозатратность алгоритма.

Алгоритм позволяет получать надежный результат, когда сечение рельефа не меняется в пределах территории исследования. В представленной реализации на основании входных данных происходит классификация горизонталей на основные и полугоризонтали с учетом высоты сечения рельефа. Выбор основных и полугоризонталей далее осуществляется на основании данной классификации. Когда есть изменения в этом параметре, возникает ошибка в классификации и продление может

не осуществиться для истинных полугоризонталей.

Созданный алгоритм характеризуется рядом ограничений. Тем не менее, он позволяет достичь главной цели – достроить полугоризонтали, чтобы избежать артефактов интерполяции.

Выводы

В ходе изучения возможностей методов интерполяции высот горизонталей по изолинейным данным ANUDEM и МАГ на примере тестового участка было установлено, что результат интерполяции характеризуется наличием артефактов интерполяции, которые снижают качество получаемых ЦМР.

Предложенный для метода МАГ способ, который заключается в предварительной обработке исходных данных – продлении полугоризонталей до границ области моделирования или до участков с высокой плотностью исходных изолиний, позволяет снизить число артефактов, возникающих на концах изолиний. Было установлено, что артефакты, связанные с концами изолиний в исходном наборе данных, не наблюдаются на прежних местах ни на ЦМР, ни на производных растрах.

Имеются некоторые ограничения предложенной методики: задача продления полугоризонталей не всегда корректно решается, если в исходных данных используется разное сечение рельефа. Кроме того, качество работы алгоритма критически зависит от растеризации, которая выполняется для расчета расстояний на одном из шагов. Для достижения наилучшего результата необходимо создавать растр с очень малым размером ячейки (менее 1 м), однако это потребует мощных вычислительных ресурсов и большого объема памяти для хранения промежуточных данных. Большая плотность исходных горизонталей также представляет проблему для разработанного инструмента: при некоторых условиях могут возникать нежелательные пересечения с исходными горизонталями.

Исходный код разработанного алгоритма размещен на сервисе GitHub и доступен по ссылке https://github.com/AnnaMurman/contour_prolongation.

Список литературы

Кошель С. М. Моделирование рельефа по изолиниям // Университетская школа географической картографии. К 100-летию профессора К.А. Салищева (ред. Берлянт А.М.). – Аспект Пресс Москва. – 2005. – с. 198–208.

Пространственное соединение [Электронный ресурс]. URL: https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/analysis-toolbox/spatial-join.htm#C_GUID-DA815C5C-4000-4B96-9FA0-84A7D6EFA0C3 (Дата обращения: 12.04.2022).

Gousie M. B., Franklin W. R. Constructing a DEM from grid-based data by computing intermediate contours //Proceedings of the 11th ACM international symposium on Advances in geographic information systems. – 2003. – pp. 71-77.

Hutchinson, M.F. A new method for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // Journal of Hydrology. – 1989. – No 106. – pp. 211-232.

Hutchinson, M.F., Xu T., Stein J. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. Geomorphometry.org, Online. – 2011.

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: https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1610965.

Пересечение [Электронный ресурс]. URL: https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/analysis-toolbox/how-intersect-analysis-works.htm (Дата обращения: 12.04.2022).

Сгладить линию [Электронный ресурс]. URL: https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/cartography-toolbox/smooth-line.htm. (Дата обращения: 13.12.2021).

Упростить линию [Электронный ресурс]. URL: https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/cartography-toolbox/simplify-line.htm. (Дата обращения: 13.12.2021).

Утончение [Электронный ресурс]. URL: https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/thin.htm. (Дата обращения: 13.12.2021).

Сведения об авторах

Анна Сергеевна Мурман – выпускница кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Андрей Львович Энтин – старший научный сотрудник кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук.

Дешифрирование космических снимков с использованием машинного обучения по данным OpenStreetMap

Мухаметшин А.Р., Самсонов Т.Е.

В настоящей работе была произведена оценка применимости векторных данных OpenStreetMap в качестве эталонов для обучающей выборки дешифровочной модели. В качестве архитектуры модели для многоклассовой классификации использовалась сверточная нейронная сеть U-Net, доказавшая свою эффективность в интерпретации данных космической съемки на протяжении нескольких лет. Территорией исследования было решено выбрать участок Германии, расположившийся западнее Берлина. На первом этапе работы производилась подготовка данных к обучению. Снимок Sentinel-2 был маскирован с помощью векторных данных OpenStreetMap, а затем разделен на одинаковые патчи меньшей размерности. На втором этапе полученный набор растров и масок был загружен в модель, где они были проиндексированы, нормализованы и поданы на обучение. Далее, были интерпретированы результаты работы модели, произведена оценка точности классификации, а также сформированы выводы о надежности данных OpenStreetMap в качестве эталонов для обучающей выборки.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть, U-Net, Sentinel-2, Python

Space images interpretation using machine learning with OpenStreetMap data

Mukhametshin A.R., Samsonov T.E.

In this paper, it is proposed to evaluate the applicability of OpenStreetMap vector data as benchmarks for the training set of the interpretation model. The U-Net convolutional neural network was used as the model architecture for multiclass classification, which has proven its effectiveness in interpreting satellite imagery data for several years. The study area was decided to choose a section of Germany, located west of Berlin. At the first stage of the work, the data for training was prepared. The Sentinel-2 image was masked using OpenStreetMap vector data and then split into equal smaller patches. At the second stage, the resulting set of rasters and masks was loaded into the model, where they were indexed, normalized, and submitted for training. Further, the results of the model were interpreted, the classification accuracy was assessed, and conclusions were drawn about the reliability of the OpenStreetMap data as standards for the training sample.

Keywords: convolutional neural network, U-Net, Sentinel-2, Python.

Введение

Рост объема генерируемых пространственных данных и актуализация политики их открытости привели к доступности заложенной в них информации широкому кругу лиц. Краудсорсинговые данные типа OpenStreetMap зачастую являются единственным источником детальных векторных пространственных данных по территории и, следовательно, имеют потенциал для использования в различных областях географии. В то же время этот потенциал остается недоисследованным, в том числе в тематическом картографировании и интерпретации данных дистанционного зондирования.

Так, в последние годы было предложено несколько новых подходов в автоматизированном дешифрировании космических снимков с использованием технологии

машинного обучения. Их отличают использование разных алгоритмов, архитектур и источников – баз пространственных данных, откуда были получены эталоны для обучения модели.

Например, в исследовании Ludwig et al. [2021] была предложена методика отображения общественных городских зеленых насаждений на основе изображений OpenStreetMap и Sentinel-2 с использованием функции убеждений. Для объединения различных источников данных (OpenStreetMap и Sentinel-2) использовалась теория Демпстера-Шейфера, учитывающая неопределенности, присущие каждому из них. Она может быть применена для объединения информации из разных источников (например, разных датчиков) или различных атрибутов объектов (например, цвета или размера). В результате, авторы добились впечатляющей точности модели в 95 %, сравнив долю правильно классифицированных пикселей с имеющимися растрами зеленых зон, полученных с более детальных аэрофотоснимков.

Следующая методика касалась автоматизированного дешифрирования более широкого набора классов городских объектов. Она описана в исследовании Luo et al. [2019], предлагающей подходы в классификации городских объектов с использованием многочисленных спектральных индексов (NDVI, NDWI, MBI, MSI, BSI) для уменьшения влияния возможных ошибок. Таким образом, применив данную методику на снимке города Ухань, авторы добились высоких показателей общей точности классификации (процента правильно классифицированных моделью пикселей в сравнении со сформированной вручную маской) – 89,4 %.

В последнее время большое количество внимания научного сообщества было уделено разработке и улучшению методик автоматизированного дешифрирования дорожной сети. Например, Funke et al. [2015] предложили способ повышения полноты данных, основанный на машинном обучении, для определения отсутствующих дорог между потенциальными местоположениями (двумя узлами дорожной сети OpenStreetMap). Метод, используя данные OpenStreetMap, извлекает несколько характерных особенностей из каждой пары кандидатов: связанность, тип улицы и степень узла в дорожной сети. Затем извлеченные объекты используются для обучения классификатора логистической регрессии с целью прогнозирования пропущенных дорог.

Также была предпринята попытка автоматического извлечения дорожных сетей путем анализа изображений, полученных с помощью дистанционного зондирования [Cheng et al., 2017]. Методика выполняла классификацию по пикселям с использованием сверточной нейронной сети без задействования данных OpenStreetMap в качестве дешифровочных эталонов, после чего получала осевую линию дорог. Mattyus, Luo, Urtasun [2017] также использовали сверточную нейронную сеть и вычисления осевой линии, но дополнительно исправили некоторые пробелы в извлеченной дорожной сети, генерируя несколько возможных отсутствующих кандидатов на дороги и выбирая часть из них с помощью другой сверточной нейронной сети, используя при этом данные о дорожной сети OpenStreetMap для проверки результата извлечения дорог из снимка.

В последнее время более точные результаты были получены при применении методик, предложенных в статьях [Bastani et al., 2018b; Ventura, 2018], которые итеративно строили граф дорожной сети путем добавления к нему новых ребер. Bastani et al. [2018a] была предложена методика, которая точна так же, как и предыдущие, но гораздо более эффективна. На основе сверточной нейронной сети она выводила направления для каждого пикселя для построения векторной модели дорожной сети.

Mattyus et al. [2016] предложили основанную на сверточной нейронной сети методику, которая использовала наземные панорамы GoogleStreetView и аэрофотоснимки в г. Карлсруэ, Германия, для извлечения дорог, парковочных места и тротуаров, которые затем могли быть интегрированы в базу данных OpenStreetMap.

В некоторых работах [Li et al., 2014; Xu et al., 2019] – были разработаны способы обнаружения многополосных дорог в данных OpenStreetMap путем анализа полигонов, образованных сетью дорог. Актуальность методики обусловлена тем, что многополосные дороги часто оцифровываются как несколько параллельных дорог с терминалами на перекрестках. Методика Xu et al. [2019], также использовала геометрические особенности для обучения классификатора с использованием алгоритма случайного леса (Random Forest). Суть заключалась в формировании прогнозов одним классификатором для обучения второго, использующего геометрические и топологические особенности дорог (например, процент соседних дорог, классифицированных как многополосные).

На основании рассмотренных статей было решено использовать архитектуру сверточных нейронных сетей U-Net, так как она демонстрировала наибольшую эффективность в обучении и распознавании различных классов объектов на космических снимках. U-Net доказала свою эффективность в классификации изображений различной сложности [Ronneberger, Fischer, Brox, 2015]. Ее отличительной чертой является наличие «узкой перемычки» в середине рабочего процесса, где после нескольких сверток начинается развертка карты признаков в приближенно исходную размерность.

Целью исследования являлась разработка модели, способной с помощью алгоритмов машинного обучения по данным OpenStreetMap распознавать и извлекать объекты различных классов с космических снимков высокого пространственного разрешения. Параллельно с этим также было важно сделать выводы о том, какие объекты, представленные в базе данных OpenStreetMap, являются наиболее достоверными эталонами при формировании обучающей выборки для нейронной сети.

Материалы и методы

С учетом полученного теоретического опыта была реализована модель для автоматизированного дешифрирования космических снимков с использованием архитектуры U-Net. Так, для этого на первом этапе была выбрана территория исследования, на которой будет производиться обучение модели – сектор Германии, расположенный к западу от Берлина, охватывающий владения провинций Бранденбург (с Берлином) и Саксонии-Анхальт. Выбор был обусловлен высокой степенью наполненности базы данных OpenStreetMap на данный участок, а также большим количеством представителей различных классов объектов (зданий, лугов, полей, лесов и водных объектов). На втором этапе, с использованием снимка Sentinel-2 и векторных файлов OpenStreetMap на рассматриваемую территорию была рассчитана маска, состоящая из 6-ти различных классов, каждому из которых соответствовало уникальное значение пикселей: 0 – фон, 1 – здания, 2 – луговая растительность, 3 – сельскохозяйственная растительность, 4 – древесная растительность, 5 – водная поверхность (рисунок 1).

На третьем этапе исходный снимок был отфильтрован для исключения из рассмотрения областей, не покрытых каким-либо значением маски (т. е. где на растре маски на данный участок приходился фон). В случае, если бы данный пункт был пропущен, в зоне фона присутствовали бы объекты, не отнесенные редакторами OpenStreetMap ранее ни к одному из классов (рисунок 2, рисунок 3).

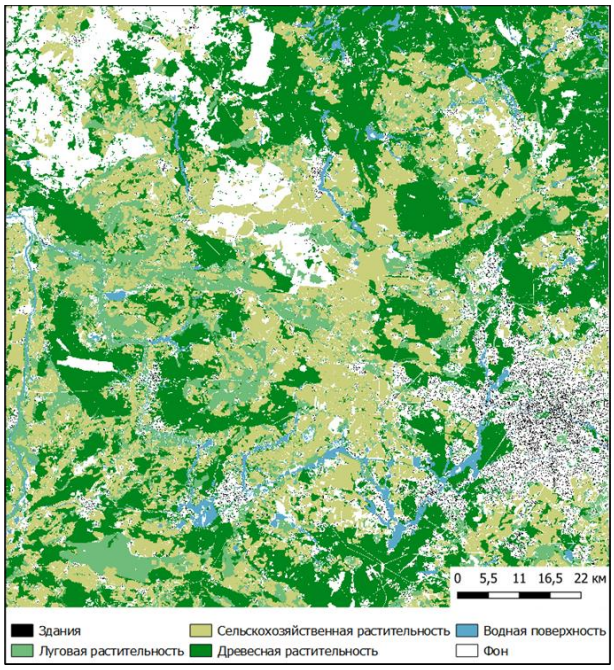


Рисунок 1 – Пространственное распределение эталонных объектов OpenStreetMap по соответствующим классам

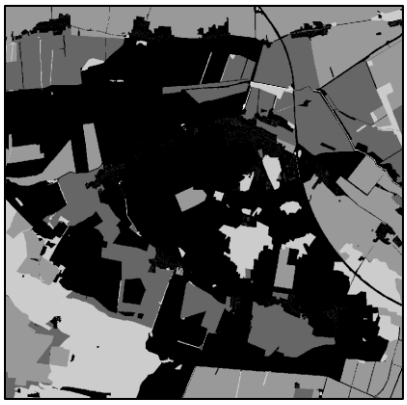


Рисунок 2 – Многоклассовая маска (черный цвет – фон, который не отнесен ни к одному из классов)

В дальнейшем это могло бы негативно сказаться на точности результирующей модели. Таким образом, на четвертом этапе имелись многоклассовая маска и маскированный спутниковый снимок, каждый из которых затем был разделен на 1764 растра размерностью 256×256 пикселей (рисунок 4).

Полученные данные были загружены в программу, которая произвела их предобработку:

- преобразовала растры в numpy-массивы;
- произвела индексацию массивов;
- нормализовала числовые значения массивов для уменьшения чувствительности модели к масштабу функций;
- поделила массивы на категории обучающих и тестовых (90% – обучающая выборка, 10% – тестовая выборка).

Рисунок 3 – Исходный снимок Sentinel-2

Затем, был запущен процесс обучения модели, продолжительность которого составила 5 часов – в течение 50 эпох. По завершении обучения были построены графики и рассчитаны показатели, характеризующие точность классификации.

Результаты

По результатам обучения нейросети были построены графики, иллюстрирующие изменение показателей ее точности и потерь в течение эпох. Метрикой точности выступила общая точность, определяющаяся как процент правильно классифицированных моделью пикселей в сравнении с поданной маской. Так, на рисунке 5 представлен график изменения точности классификации объектов.

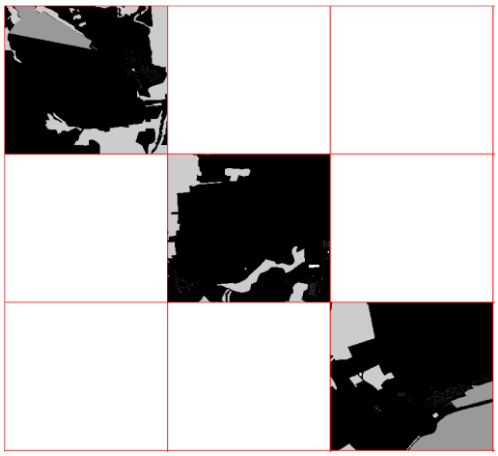


Рисунок 4 – Пример разрезанных масок размерностью 256×256 пикселей

На графике присутствуют две кривые – Training Accuracy и Validation Accuracy. Training Accuracy подразумевает точность классификации изображений из обучающей выборки. Validation Accuracy же показывает точность классификации на изображениях из тестовой выборки, которые не участвовали в процессе обучения.

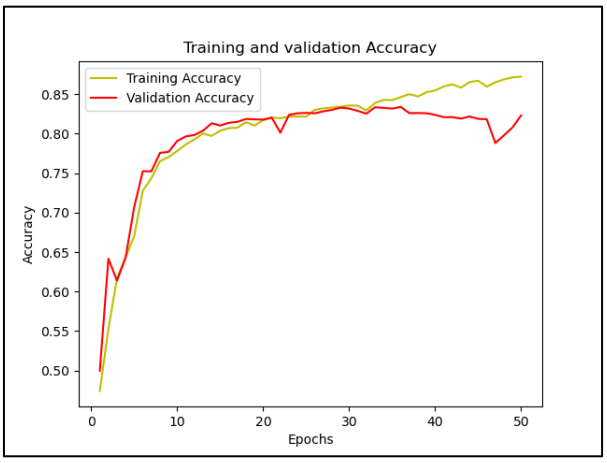


Рисунок 5 – График изменения показателей точности в течение эпох

На графике две кривые идут по одной траектории в течение 32 эпох. Однако, затем начинают расходиться, что свидетельствует о переобучении модели. Переобучение заключается в том, что модель, перебирая тренировочные изображения излишнее множество раз, начинает их запоминать, адаптируясь не под общие зависимости в данных, а под особенности отдельных примеров. Таким образом, в данном случае 32 эпохи являются наиболее оптимальным по продолжительности параметром обучения, т. к. в дальнейшем точность модели начинает падать в связи с увеличением количества ошибок классификации на тестовых примерах. Результирующая точность модели следует оценивать по точности классификации тестовой выборки, которая равна 82,32%.

Также был рассчитан график потерь, по которому возможно оценить скорость обучения модели (рисунок 6). Так, начиная с 24 эпохи, скорость обучения начинает постепенно снижаться, а с 36 – останавливается.

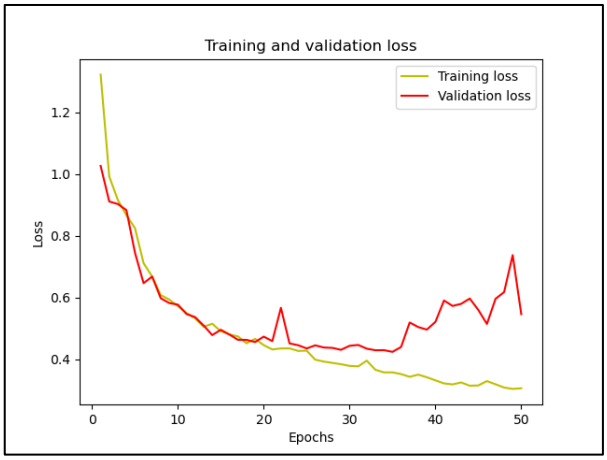


Рисунок 6 – График изменения величины потерь в течение эпох

Для оценки точности классификации каждого класса был рассчитан показатель IoU (Intersection over Union), описывающий долю перекрытия экстента объекта до и после классификации. Он рассчитывается как отношение площади зоны перекрытия и совокупной площади прямоугольников, как если бы они были единой фигурой.

Показатели IoU приведены в таблице 1. Основываясь на них, можно утверждать, что наиболее точно классифицированными объектами оказались леса (0,81) и здания (0,79) с показателями около 0,8. Наименее же точными оказались сельскохозяйственные поля (0,57), луговая растительность (0,35) и водная поверхность (0,11). Среднее значение – 0,61.

Таблица 1 – Показатели *IoU* для различных классов

Среднее значение	Здания	Луговая растительность	Сельскохозяйственные поля	Древесная растительность	Водная поверхность
0,61	*0,79*	*0,35*	*0,57*	*0,81*	*0,11*

Приведенная точность классификации может быть объяснена несколькими причинами.

Здания

Несмотря на проблему, связанную с недостаточным пространственным разрешением Sentinel-2 для детально векторизованных контуров небольшой частной застройки, точность классификации зданий является одной из самых высоких. Это стало возможным благодаря присутствию большого количества крупных строений в густонаселенных городах, в частности, в Берлине и его агломерации. Крупные строения помогают нейросети сформировать отличительные представления об их правильной геометрической форме, четких границах и высокой спектральной яркости (рисунок 7). К тому же для редакторов OpenStreetMap выделение четких контуров зданий не является затруднением, поэтому данный класс эталонов остается одним из наиболее достоверных.

Рисунок 7 – Эталоны для зданий

Древесная растительность

Данный класс объектов оказался наиболее точным по итогам классификации модели. Выделяется несколько причин такого показателя точности. Так, участки с древесной растительностью (леса) отличаются большой площадью по отношению к пространственному разрешению, низкой спектральной яркостью в натуральной цветопередаче, мелкозернистой текстурой и очень четкой границей со всеми прочими объектами (рисунок 8). Участникам-редакторам OpenStreetMap, как и нейронной сети, в данном случае легко формировать представление о рисунке класса. В связи с этим он является наиболее достоверным по показателям точности классификации.

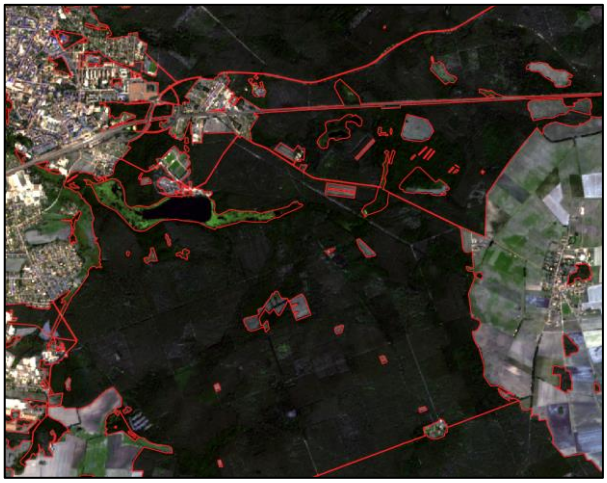


Рисунок 8 – Эталоны для лесов

Сельскохозяйственные поля и луговая растительность

Данные классы выступили третьими и четвертыми соответственно по счету в точности классификации и здесь возможно выделить несколько причин низкой точности. Единственными отличительными особенностями между полями и лугами являются форма, цвет и спектральная яркость. Большая часть полей имеет прямолинейные контура, преобладают белый, серый и светло-бежевый цвета, в некоторых местах прослеживаются четкие границы. Однако, порой эти границы являются сглаженными и трудноразличимыми. На рисунке 9 прослеживается описываемая ситуация. Все объекты,

представленные на рисунке (за исключением строений и лесов), являются полями, т. к. имеют прямолинейную нарезку с различимыми границами между различными культурами. Но, многие из них являются либо незасеянными и заросшими луговой растительностью, либо имеют специфичные виды культурных растений, которые на снимке отображаются зеленым цветом. Так или иначе при дешифрировании данных объектов не были учтены эти факторы, отчего представленные эталоны не формируют однозначного образа о том, как на самом деле отличаются два данных класса, т. к. часто имеют одинаковый цвет и форму.

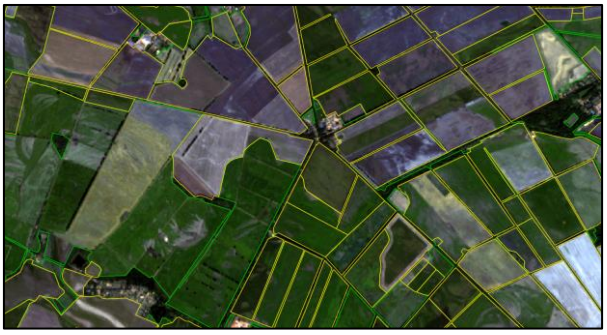


Рисунок 9 – Эталоны для полей (желтый) и для лугов (зеленый)

Водная поверхность

Вопрос о низкой точности классификации воды остается открытым, т. к. достоверность дешифровочных эталонов, а именно точность выделения контуров участниками-редакторами OpenStreetMap, является одной из самых высоких. Причины такой низкой точности следует искать в самом рисунке водных объектов. Так, обычно водоемы и водотоки имеют плавные контура с предельно низкой спектральной яркостью в красном, зеленом и синем каналах. Однако, в данное время года (начало июня) в Восточной Германии мы можем наблюдать цветение воды (рисунок 10). По этой причине многие озера и реки приобретают зеленый цвет, схожий с цветом луговой и культурной растительности. В связи с этим модели затруднительно формировать представления об образе водного объекта.

Рисунок 10 – Эталоны для водных объектов

Выводы

Таким образом, в данной работе была реализована нейросеть, а также определены наиболее достоверные классы при формировании эталонов для обучающей выборки по данным OpenStreet-Map.

В процессе формирования обучающей выборки для сверточной нейронной сети следует обращать особое внимание на специфику местности, по которой будет производиться обучение. Для более четкого разделения классов, имеющих общие признаки, следует использовать большее количество источников информации, например, вовлекать в обучение дополнительные инфракрасные каналы и радиолокационные снимки.

Для получения большего количества информации о спектральных, структурных и текстурных признаках объектов следует использовать снимки большего пространственного разрешения, т. к. при его уменьшении теряется большой объем информации о характерных чертах того или иного класса объектов.

Помимо OpenStreetMap среди источников достоверных дешифровочных эталонов также стоит рассматривать организации, формирующие свою базу данных на экспертных заключениях специалистов-картографов. Это пригодится для создания репрезентативной обучающей выборки.

При использовании данных OpenStreetMap для формирования дешифровочных эталонов следует искать зоны, имеющие наибольшую плотность интересующих объектов, для минимизации объема потерянной информации.

Открытый набор скриптов, использовавшихся в процессе работы, представлен в репозитории GitHub (https://github.com/ArthurMukhametshin/Convolutional-neural-network-for-automated-decryption-of-satellite-images).

Список литературы

Bastani F., He S., Abbar S., Alizadeh M., Balakrishnan H., Chawla S., Madden S. Machine-Assisted Map Editing // Proceedings of the 26th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. – 2018. – pp. 23–32.

Bastani F., He S., Abbar S., Alizadeh M., Balakrishnan H., Chawla S., Madden S., DeWitt D. RoadTracer: Automatic Extraction of Road Networks from Aerial Images // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City, UT: IEEE, 2018b. – pp. 4720–4728.

Cheng G., Wang Y., Xu S., Wang H., Xiang S., Pan C. Automatic Road Detection and Centerline Extraction via Cascaded End-to End Convolutional Neural Network // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 2017. – Vol. 55. – No 6. – pp. 3322–3337.

Funke S., Schirrmeister R., Storandt S. Automatic Extrapolation of Missing Road Network Data in OpenStreetMap, 2015. –p. 9.

Li Q., Fan H., Luan X., Yang B., Liu L. Polygon-based approach for extracting multilane roads from OpenStreetMap urban road networks // International Journal of Geographical Information Science. – 2014. – Vol. 28. – No 11. – pp. 2200–2219.

Ludwig C., Hecht R., Lautenbach S., Schorcht M., Zipf A. Mapping Public Urban Green Spaces Based on OpenStreetMap and Sentinel-2 Imagery Using Belief Functions // IJGI. – 2021. – Vol. 10. – No 4. – p. 251.

Luo N., Wan T., Hao H., Lu Q. Fusing High-Spatial-Resolution Remotely Sensed Imagery and OpenStreetMap Data for Land Cover Classification Over Urban Areas // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11. – No 1. – p. 88.

Mattyus G., Wang S., Fidler S., Urtasun R. HD Maps: Fine-Grained Road Segmentation by Parsing Ground and Aerial Images // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA: IEEE. – 2016. – p. 3611–3619.

Mattyus G., Luo W., Urtasun R. DeepRoadMapper: Extracting Road Topology from Aerial Images // 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Venice: IEEE, 2017. – pp. 3458–3466.

Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015 Lecture Notes in Computer Science. / eds. N. Navab et al. Cham: Springer International Publishing, 2015. – pp. 234–241.

Ventura C. Iterative Deep Learning for Road Topology Extraction // 2018. – p. 13.

Xu Y., Xie Z., Wu L., Chen Z. Multilane roads extracted from the OpenStreetMap urban road network using random forests // Transactions in GIS. – 2019. – Vol. 23. – No 2. – pp. 224–240.

Сведения об авторах

Артур Рамильевич Мухаметшин – студент 4 курса бакалавриата кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Тимофей Евгеньевич Самсонов – ведущий научный сотрудник кафедры картографии и

геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук.

Автоматизированное построение схематизированных ленточных знаков распределительного типа

Пинигин Г.В., Самсонов Т.Е.

Схематизированные (схематические) ленточные знаки распределительного типа – картографический способ изображения, разновидность знаков движения, который заключается в изображении распределения потоков по направлениям при помощи графических переменных, зависящих от объемов потоков. Построение подобных знаков не поддается автоматизации при помощи стандартных средств геоинформационного программного обеспечения. В работе представляется пакет расширения языка программирования Python и модуль расширения программного продукта QGIS, позволяющие частично автоматизировать построение схематизированных ленточных знаков. Для расчета топологии распределения используется построение дерева Штейнера на основе логарифмических спиралей. Подход позволяет получить дерево распределение потоков, гарантированно не содержащее самопересечений и состоящее из небольшого количества узлов. Подобная структура удобна для дальнейшего использования при картографировании разного рода перемещения объектов.

Ключевые слова: карты распределения потоков, дерево Штейнера, QGIS

Automated generation of distributive flow maps

Pinigin G.V., Samsonov T.E.

Distributive flow maps are type of flow maps that visualize the distribution of flow between an origin and multiple destinations with an aesthetic dependent from flow magnitude. An automation of distributive flow mapping with standard geoinformation techniques is complicated. We present a python package and a QGIS plugin built on top of it, which partly-automatically compute distributive flow maps. The computation of flow map's topologic structure is based on a Steiner tree which uses logarithmic spirals. Implemented approach guarantees an absence of self-intersections of flow tree elements and provides simple tree shape. This structure is convenient for further usage in mapping of different flow distributions.

Keywords: distribution flow maps, Steiner arborescence, QGIS

Введение

Создание карт перемещения объектов при помощи схематизированных ленточных знаков рассматривается в специализированной литературе давно. В современной зарубежной литературе тематические карты, изображающие перемещение между географическими объектами, называются *flow maps*, что можно дословно перевести как *карты потоков* [Dent et al., 2009; Field, 2018; Slocum и др., 2013]. Опираясь на российскую и советскую традицию классификации карт и способов изображений [Лютый, 1981; Салищев, 1990], описанное построение корректнее назвать картографическим способом изображения *схематизированных ленточных знаков распределительного типа*.

Карты, построенные при помощи этого способа изображения, наглядно демонстрируют характер распределения величины перемещения по направлениям и используются приблизительно с середины XIX века [Robinson, 1955]. Тем не менее, до сих пор возможности автоматизации построения

схематизированных ленточных знаков в программном обеспечении геоинформационных систем (ПО ГИС) представлены лишь ограниченно [Buchin et al., 2011b].

Схематизированные ленточные знаки изображают траектории потоков, которые или неизвестны, или имеют сложную конфигурацию, или существуют как множество линий, или не существуют в принципе, в чем согласны авторы всех рассмотренных широких по тематике изданий [Салищев, 1990; Dent et al., 2009; Field, 2018; Slocum et al., 2013]. Исходя из этого представления, формулируются критерии качества построения знаков, которые, в первую очередь, относятся к оценке наглядности получаемого изображения. Для снижения визуальной нагрузки требуется обеспечить плавное ветвление линий. Вместе с тем длина получаемых линий также должна быть минимизирована. Следует избегать пересечения элементов, составляющих знак [Buchin et al., 2011b; Debiasi et al., 2014]. Кроме того, разные реализации методов построение схематизированных ленточных знаков характеризуются разным способом интеграции в ПО ГИС. Часть продуктов требует от пользователя навыков программирования [Sun, 2019], часть не интегрирована в среду ПО ГИС [Buchin et al., 2011b; Nocaj, Brandes, 2013]. Некоторые интегрированные в ПО ГИС продукты для визуализации потоков не решают задачу в данной постановке [Jenny et al., 2016; Raposo, 2017].

В рамках исследования мы имплементируем подход к построению топологической структуры схематизированных ленточных знаков (дерева распределения потоков), описанный в работах [Buchin et al., 2011b; Buchin et al., 2015] и адаптируем его для интерактивного использования в среде QGIS. Данный подход выбран нами, потому что он гарантирует отсутствие пересечений элементов построения, позволяет выполнять построения с приемлемой для интерактивного использования вычислительной сложностью, позволяет в дальнейшем накладывать более строгие ограничения на структуру построения, может быть масштабирован для более общих случаев визуализации [Buchin et al., 2011b; Nocaj, Brandes, 2013].

Полученный программный продукт состоит из двух частей: ядра, выполняющего построение топологической структуры, и модуля дополнения, предоставляющий пользовательский интерфейс в среде ПО QGIS. Ядро опубликовано в репозитории GitHub https://github.com/glebpinigin/flowmapper, модуль дополнения для ПО Qgis в репозитории https://github.com/glebpinigin/FlowMapBuilderPlugin.

Материалы и методы

В работах [Buchin et al., 2011a; Buchin et al., 2011b; Buchin et al., 2015] представлено решение поставленной задачи при помощи жадного алгоритма построения *дерева Штейнера* – дерево (граф), обладающее минимальной взвешенной суммой ветвей и построенное по регулярной сети точек. В рамках данного подхода сеть точек создается при помощи замены каждого вектора потока на области, ограниченные логарифмическими спиралями. В таком случае потенциальные точки ветвления – это точки пересечения «спиральных регионов». Таким образом понятие дерева Штейнера, обычно применяемое для регулярной сети точек, расширяется для рассмотрения сети точек, расположенных в узлах пересечения «спиральных регионов» [Buchin et al., 2015]. Пример построения изображен на рисунке 1. Круглые зеленые маркеры – листья дерева распределения потоков, квадратный зеленый маркер – корень дерева распреде-

ления потоков, светло-серые фигуры – спиральные области. Точки пересечения спиральных областей – это потенциальные точки ветвления. Выбранные в результате работы алгоритма точки ветвления изображены белыми маркерами. Выбранные точки ветвления вместе с корнем, листьями и границами спиральных областей между ними (отмечены черным на рисунке 1) составляют дерево распределения потоков.

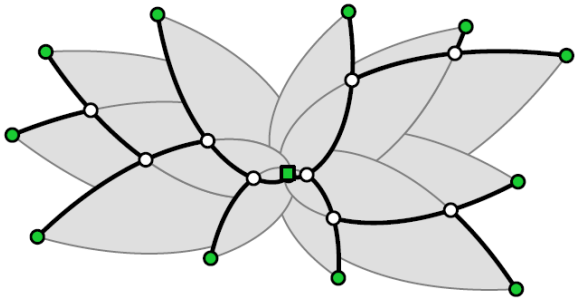


Рисунок 1 – Построение дерева распределения потоков при помощи моделирования спиральных областей [Buchin et al., 2015]

Последним этапом алгоритмов построения схематизированных ленточных знаков на основе поиска дерева Штейнера является сглаживание (или оптимизация) линий, соответствующих ребрам дерева распределения потоков. В соответствующих работах алгоритмы сглаживания описаны отдельно от алгоритмов построения дерева потоков. Вместе с тем алгоритмы построения дерева распределения потоков устроены таким образом, чтобы минимизировать влияние процедуры сглаживания.

Отметим, что для максимизации вычислительной эффективности подхода, его авторы предложили именно жадный алгоритм поиска дерева распределения потоков. Это означает, что он использует эвристическое предположение, позволяющее найти локальный оптимум характеристик дерева.

Описанный подход был выбран как основа для реализации цели исследования – разработки инструмента автоматизации для построения схематизированных ленточных знаков. Авторами подхода представлены основные позиции математического аппарата, на котором основаны построения – понятие об области, ограниченной витками логарифмических спиралей (спиральной области, рисунок 2). Также ими доказан ряд свойств промежуточных построений, которые позволяют эффективно вычислять топологическую структуру знаков в виде планарного графа.

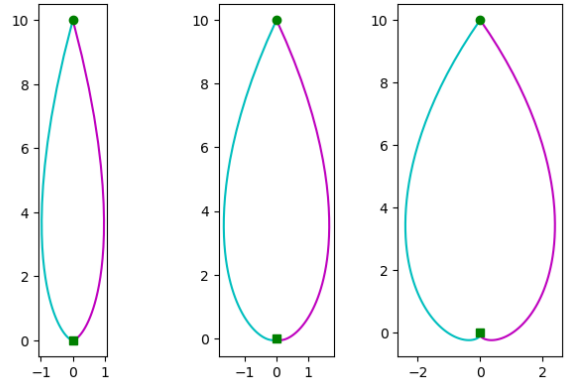


Рисунок 2 – Спиральные области со значениями α, равным 15° (слева), 25° (по центру), 35° (справа). Квадратными маркерами изображены корни спиральных областей, круглыми – вершины. Фиолетовым цветом изображена левая спираль, бирюзовым – правая (отсчет со стороны вершины).

На основе определения, данного авторами подхода, мы выводим ряд важных для построения уравнений. Уравнение логарифмической спирали в явном виде:

$$R^{+}(\varphi) = R_p e^{-\frac{\varphi-\varphi_p}{\tan(\alpha)}} \quad (1)$$

$$R^{-}(\varphi) = R_p e^{-\frac{\varphi-\varphi_p}{\tan(-\alpha)}} \quad (2)$$

Где $R^{+}(\varphi)$ – радиус правой логарифмической спирали, $R^{-}(\varphi)$ – радиус левой логарифмической спирали, φ – полярный угол. Уравнение пересечения логарифмических спиралей для векторов потоков с конечными точками $p(R_0, \varphi_0), q(R_1, \varphi_1)$:

$$R_0 e^{-\frac{\varphi-\varphi_0}{\tan(\alpha)}} = R_1 e^{-\frac{\varphi-\varphi_1}{\tan(-\alpha)}} \quad (3)$$

или

$$\varphi = \frac{(\ln\frac{R_0}{R_1})\tan\alpha + \varphi_1 + \varphi_0}{2}, \quad (4)$$

если для точки p описана правая спираль, а для точки q левая. Решением уравнения пересечения (4) является полярный угол точки пересечения. Если подставить полученный полярный угол в уравнения правой (1) или левой (2) спиралей, получится полярный радиус точки пересечения. Представленные уравнения позволяют далее реализовать быстрый алгоритм поиска пересечения спиральных областей – что необходимо для поиска точек ветвления, а также вывести уравнение длины дуги логарифмической спирали, позволяющее далее оптимизировать количество вершин конечного результата построений. Длина дуги L логарифмической спирали с вершиной в точке $P(R_p, \varphi_p)$ определяется следующим образом:

$$L = \int \sqrt{\left(R_p e^{-\frac{\varphi-\varphi_p}{\tan(\alpha)}}\right)^2 + \frac{d}{d\varphi}^2 \left(R_p e^{-\frac{\varphi-\varphi_p}{\tan(\alpha)}}\right)} d\varphi$$

(5)

Данный неопределенный интеграл имеет следующее решение:

$$L = tg(\alpha)\left(-\sqrt{{R_p}^2 csc^2(\alpha) e^{-2ctg(\alpha)(\varphi-\varphi_p)}}\right)$$

(6)

Процесс построения схематизированных ленточных знаков происходит в несколько этапов.

Построение топологической структуры дерева распределения потоков. На этом этапе выполняется решение задачи Штейнера. Результатом работы этого этапа является планарный граф – дерево, корнем которого является отправная точка потоков, листьями – точки назначения потоков (или наоборот), узлами ветвления – узлы, вычисленные при помощи описанного выше алгоритма.

Построение геометрической структуры дерева. На этом этапе вычисляется позиционная составляющая каждого ребра графа, полученного в пункте 1. Задача заключается в том, чтобы расставить узлы сохраняемой геометрии равномерно вдоль логарифмических спиралей (т. е. с сохранением постоянной длины дуги между соседними узлами).

В нашей реализации могут быть сохранены результаты всех трех этапов построения. Однако при использовании модуля дополнения QGIS сохраняется результат второго этапа построения, а сглаживание происходит «на лету» при отрисовке. Это позволяет корректнее и плавнее изображать дерево в том масштабе, в котором оно отображается пользователю.

Результаты

На основе разработанного математического аппарата реализован алгоритм построения дерева распределения потоков. Результатом работы является программный код инструмента построения схематизированных ленточных знаков. Он состоит из двух сегментов: ядра (*подмодуль 1*) и модуля расширения для среды QGIS (*подмодуль 2*). Алгоритм распределения, реализованный в ядре, может быть использован и вне среды QGIS. Принципиальная структура устройства разработанного программного продукта такова (см. также рисунок 3):

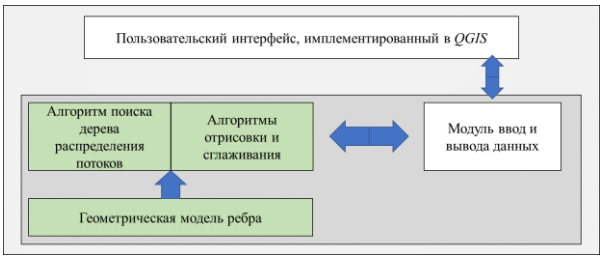


Рисунок 3 – Компоненты программного модуля для разработки

Подмодуль 1

Модель спиральной области (уравнения логарифмических спиралей, уравнения пересечений спиралей, уравнения длин дуг).

1. Структура данных дерева распределения потоков.
2. Алгоритм построения дерева распределения потоков.
3. Алгоритм сглаживания распределения потоков.
4. Модели и структуры данных утилитарного характера.
5. Интерфейс взаимодействия с подмодулем 2.

Подмодуль 2

1. Элементы графического интерфейса пользователя.
2. Модель обработки контекста, которым оперирует пользователь.
3. Алгоритм отрисовки схематизированных ленточных знаков.
4. Интерфейс взаимодействия с подмодулем 1.

Жадный алгоритм поиска дерева Штейнера, реализованный в подмодуле 1, устроен таким образом, что рассматривает дерево распределения с топологической точки зрения. Тем не менее, для его работы необходимо определить модель спиральной области, определить способ поиска пересечения спиральных областей и пр. Для более эффективной работы алгоритма реализована модель аналитического решения этих геометрических задач, основанная на приведенных выше уравнениях. Подмодуль 2 связывает ядро разработки (подмодуль 1) со средой QGIS. Он предоставляет пользовательский интерфейс, состоящий из элементов – виджетов.

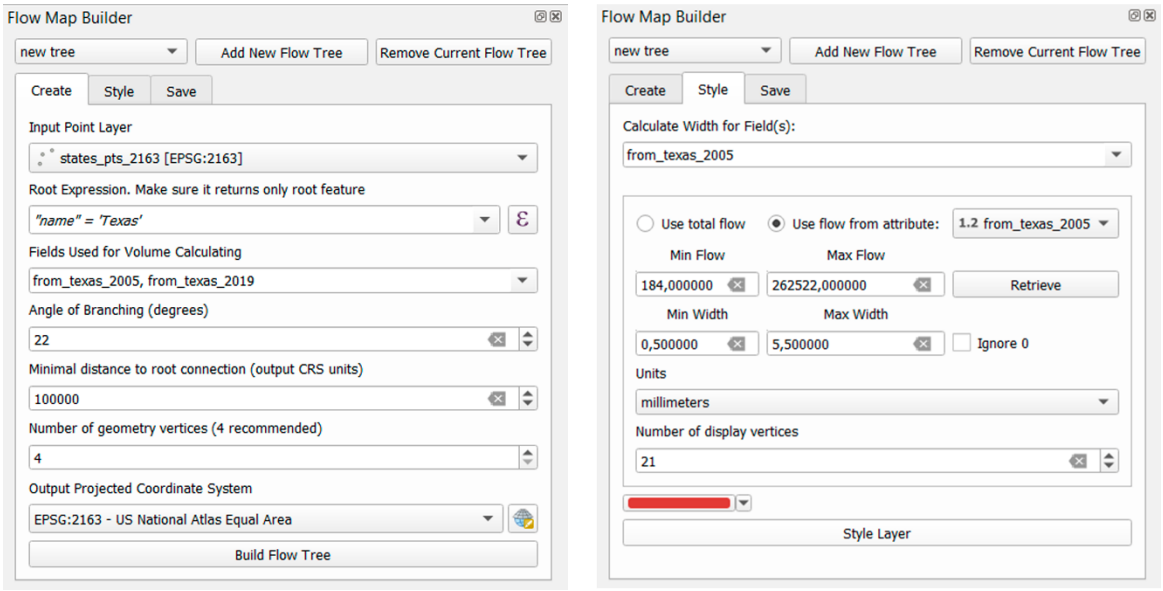


Рисунок 4 – Графический интерфейса пользователя разработанного инструмента. Вкладка создания (слева) и настройки отображения (справа)

На рисунке 4 изображено окно разработанного модуля, которое автоматически встраивается в интерфейс QGIS. В верхней части панели расположены клавиши управления контекстом. Клавиша «*Add New Flow Tree*» позволяет добавить новое дерево распределения потоков. После ввода его названия оно отобразится как верхний элемент выпадающего списка, а все остальные элементы интерфейса станут активными. Пользователь может указать входные данные для построения – слой начальных и конечных точек векторов потоков; выражение, при помощи которого определяется корень потока; список атрибутов для вычисления объема потока; параметр α и проекцию, в которой необходимо выполнять построение. Кроме того, пользователь может ввести количество узлов для расчета геометрии дерева распределения, а также минимальную

удаленность узла ветвления от корня.

За хранение введенных пользователем данных, их связь с результатом построения и корректность переключения между объектами построения отвечает модель обработки контекста. Она достаточно проста и хранит в себе атрибуты, соответствующие полям пользовательского ввода и методы для безопасного изменения этих атрибутов.

После нажатия клавиши «*Build Flow Tree*» выполняется построение дерева распределения потоков и его визуализация. Первичная автоматическая визуализация выполняется при помощи отрисовки спиралей тонкими линиями случайно выбранного цвета. Далее пользователь может изменить значение α и выполнить построение заново. Результат построения представлен на рисунке 5.

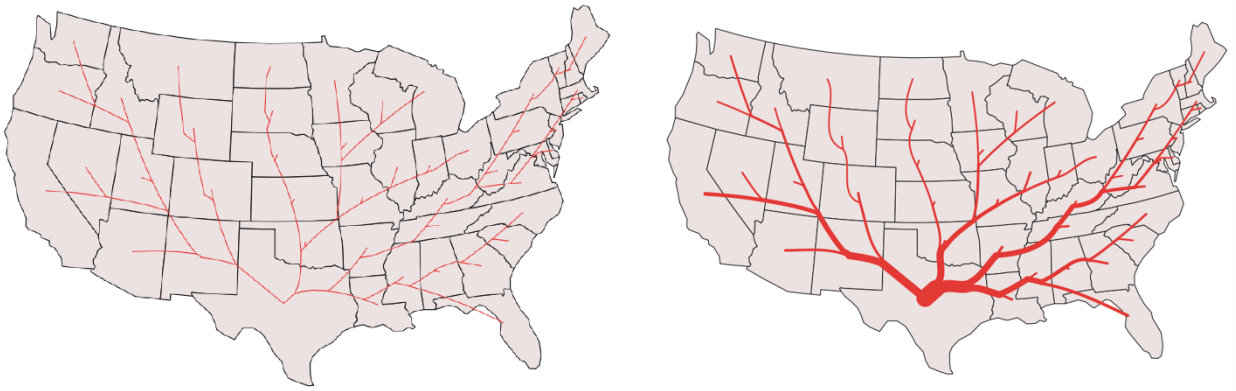


Рисунок 5 – Фрагмент окна *QGIS* с результатом построения дерева распределения потоков. Без применения настроек отображения (справа) и с применением настроек отображения (слева)

Следующим этапом после построения дерева распределения потоков является этап назначения толщины его ребрам. Для реализации этого этапа на панели модуля создана вкладка «*Style*». На данной панели представлен выпадающий список полей, которые содержатся в слое с деревом распределения потоков, клавиша выбора цвета, поля ввода максимального и минимального значений для отрисовки, минимальной и максимальной ширины для отрисовки. Пользователь выбирает источник данных для автоматической подстановки в эти поля. После нажатия клавиши «*Style Layer*» введенные значения применяются к слою. Также активируется функция сглаживания линий.

Картографическое изображение, полученное на данном этапе, является одним из промежуточных результатов построения карты, отражающей перемещение объектов. Пользователю остается добавить значки для точек, между которыми осуществляется перемещение, элементы общегеографической основы и построение будет завершено.

Пользователю доступно редактирование траектории, соответствующей ветвям дерева. При этом пользователю достаточно изменить положение нескольких узлов, чтобы сильно изменить характер линии без потери гладкости. Пример представлен на рисунке 6.

Обсуждение

Для оценки возможности сочетания получаемых схематизированных ленточных знаков с другими элементами картографического изображения, была создана карта пассажиропотока аэропортов Северной Дакоты по штатам США. Создание карты проводится двумя разными способами. В первом случае используются только стандартные возможности ПО QGIS, во втором случае стандартные возможности ПО сочета-

ются с представленной разработкой. Сравнение таких карт позволит понять, насколько оправданно использование разработки.

Рисунок 6 – Результат отрисовки дерева распределения потоков в режиме редактирования. Желтая линия – сглаженная траектория потока; синие точки – узлы дерева распределения

На рисунке 7 изображена суммарная величина пассажиропотока аэропортов Северной Дакоты по штатам США при помощи стандартных средств ПО QGIS. Для изображения пассажиропотока использован способ картодиаграмм. Кроме того, в качестве сопроводительной информации изображен показатель валового регионального продукта штатов на душу населения (ВРП на душу населения) способом картограммы. Таким образом, картографируются два показателя. На двух верхних картах, представленных на рисунке 8 используется тот же набор картографируемых показателей, однако пассажиропотоки изображены при помощи схематизированных ленточных знаков.

На рисунках 7 и 8 заметна пространственная неоднородность пассажиропотоков: пассажиропотоки в западные штаты в целом выше, чем в восточные. На картодиаграмме заметно, что размеры диаграмм западных штатов в целом больше, чем восточных. Однако оценить по карте суммарный пассажиропоток в западные штаты с суммарным пассажиропотоком в восточные затруднительно: требуется мысленно сложить размеры знаков и сопоставить их. Посчитав количество кругов, можно убедиться, что к северу и к западу от штата Северная Дакота лежит приблизительно равное количество знаков. А это значит, что если среди них невелико количество крупных диаграмм, то велика вероятность, что суммарное значение больше.

При этом как картодиаграмма так и схематизированные ленточные знаки, не загораживают нижележащие элементы картографического изображения полностью. Так, в обоих случаях пользователь может без затруднений рассматривать картограмму и сопоставлять пространственное распределение ВРП с распределением пассажиропотока. В данном случае какой-либо заметной прямой связи между показателями не наблюдается. Однако можно заметить, что наибольшее число пассажиров из Северной Дакоты направляется в штаты со средними значениями ВРП.

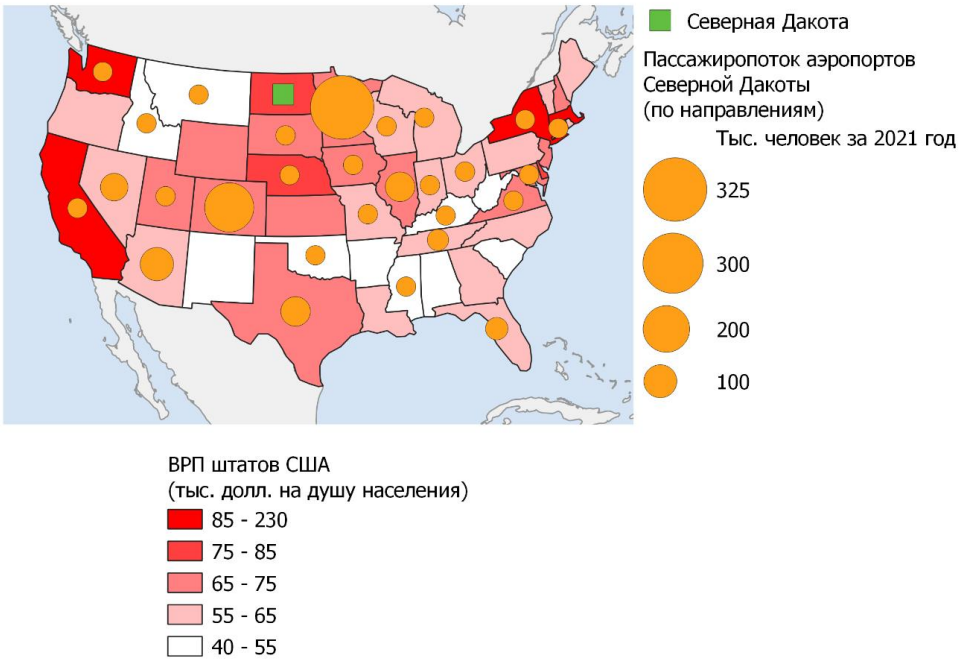


Рисунок 7 – Суммарный пассажиропоток из аэропортов Северной Дакоты в аэропорты других штатов США. Способ картодиаграмм

Заметим, что фактически схематические ленточные знаки используют диаграммы в качестве составной части. Листья и корень дерева распределения потоков могут быть изображены при помощи пунсонов с радиусом, зависящим от величины потока. На рисунке 8 представлены два способа назначения радиуса пунсонам. На верхнем изображении радиус пунсона равен ширине линии, изображающей пассажиропоток. Это логичное решение позволяет точно указать положение листа или корня, не разрабатывая новую шкалу размеров, а используя уже разработанную для потоков. Однако в таком случае листья небольших по объему потоков становятся не различимы. Проблему можно решить, введя отдельную шкалу размера пунсонов, которые были бы несколько шире линий потоков. В таком случае необходимо разрабатывать две разные шкалы: одну для линий, другую для пунсонов. Использование двух разных шкал для картографирования одного показателя затрудняет восприятие карты пользователем. Особенно это будет проявляться, если добавить обе шкалы в легенду. Очевидно, что оставить радиус всех узлов одинаковым не представляется возможным: или придется назначать слишком большой радиус для малозначимых узлов, чтобы все они были шире линий потоков, или некоторые будут тоньше линий потоков.

Использование диаграмм в качестве составной части схематических ленточных знаков позволяет увеличить количество картографируемых показателей, как это сделано на нижнем изображении из рисунка 8. На данном изображении добавлен еще один картографируемый показатель, численность населения штатов, который изображается при помощи картодиаграммы. Так как все диаграммы соответствуют штатам, то некоторые из них совпадают с листьями и корнем дерева распределения потоков. В данном случае, так как нет очевидной связи между картографируемыми показателями, эта информация избыточна. Во-первых, некоторые из узлов имеют радиус меньший, чем соответствующие им линии потоков, что снижает изобразительные качества карты. Во-вторых, не-

ясно, какие из пунсонов действительно являются узлами, а какие случайно оказались близко к линиям потоков. Таким образом, описанный прием может быть полезен лишь в случае имеющейся географической связи между показателями, которую требуется отобразить на карте. Его использование в остальных случаях требует доработки алгоритма визуализации схематизированных ленточных знаков.

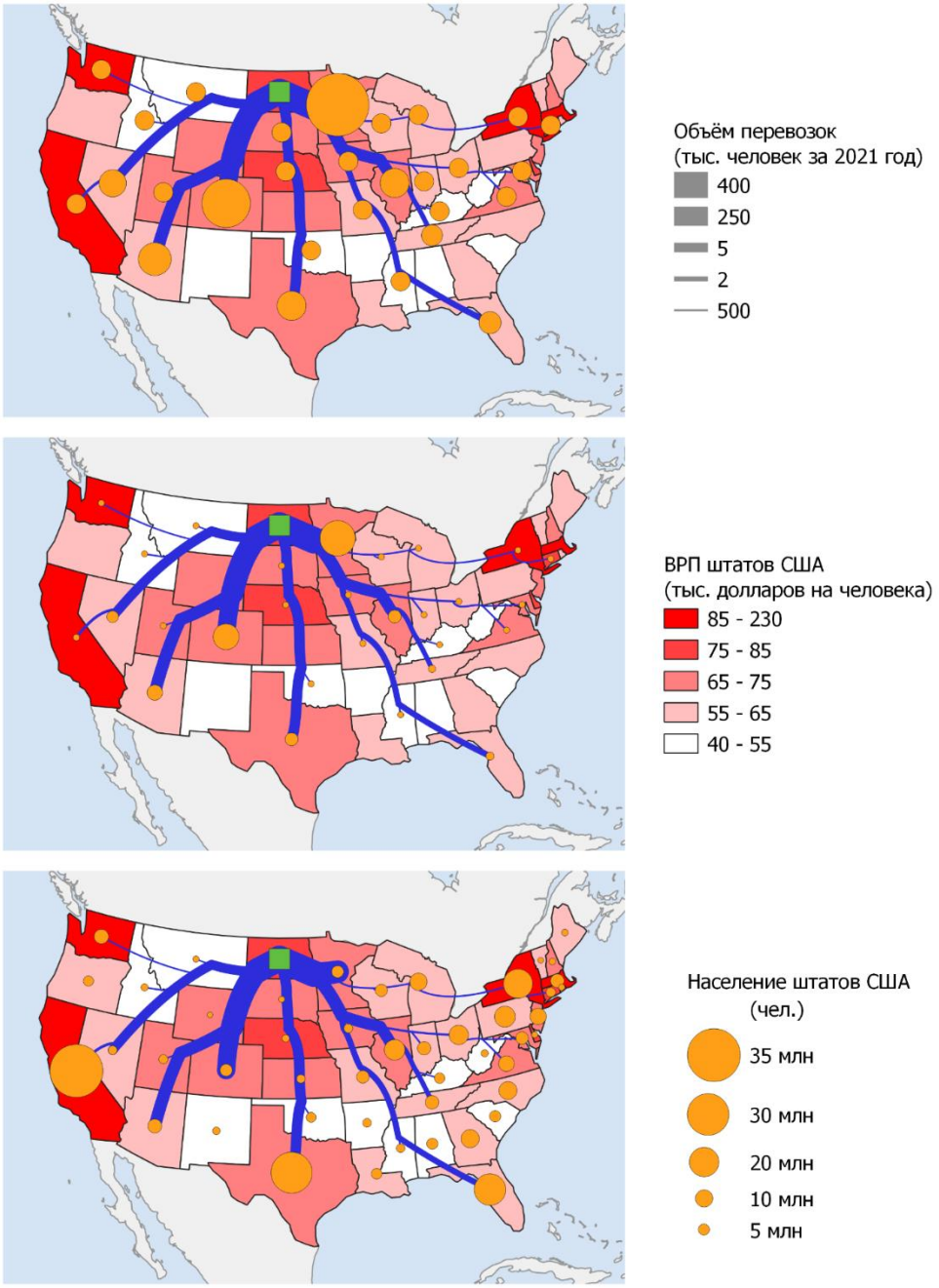


Рисунок 8 – Суммарный пассажиропоток из аэропортов Северной Дакоты в аэропорты других штатов США. Способ схематизированных ленточных знаков. Размером пунсонов на верхнем и среднем изображениях отражены пассажиропотоки (см. пояснения в тексте)

Заключение

Разработанный программный продукт позволяет автоматизировать построение дерева распределения для создания карт при помощи схематизированных ленточных

знаков. В ходе работы был переработан подход, предложенный в работе [Buchin, Speckmann, Verbeek, 2015] для интеграции в среду QGIS. В результате наша реализация описанного подхода позволяет реализовать интерактивный рабочий процесс построения карты при помощи схематизированных ленточных знаков. Данный способ изображения показал свою наглядность на контрольном примере, а также возможность совмещения с дополнительными показателями на карте.

Список литературы

Лютый А.А. Язык карты / А.А. Лютый – М.: Знание, 1981. – 48 с.

Салищев К.А. Картоведение: Учебник / К.А. Салищев – М.: Издательство МГУ, 1990. Вып. 3. – 400 с.

Buchin K., Speckmann B., Verbeek K. Angle-Restricted Steiner Arborescences for Flow Map Layout // Algorithms and Computation Lecture Notes in Computer Science. / eds. T. Asano et. al., Berlin – Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011a – pp. 250–259.

Buchin K., Speckmann B., Verbeek K. Flow Map Layout via Spiral Trees // IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. – 2011b. – Vol.17, No.12 – pp. 2536–2544.

Buchin K., Speckmann B., Verbeek K. Angle-Restricted Steiner Arborescences for Flow Map Layout // Algorithmica. – 2015. – Vol.72, No.2. – pp. 656–685.

Debiasi A., Simões B., Amicis R. Supervised Force Directed Algorithm for the Generation of Flow Maps. – 2014.

Dent B. D., Torguson J., Hodler T. W. Cartography: thematic map design / New York: McGraw-Hill Higher Education, 2009. – 6th ed. – pp. 336.

Field K. Cartography: a compendium of design thinking for mapmakers / Redlands, California: Esri Press, 2018. – pp. 549.

Jenny B., Stephen D., Muehlenhaus I., Marston B., Sharma R., Zhang E., Jenny H. Design principles for origin-destination flow maps // Cartogr. Geogr. Inf. Sci. – 2016. – Vol.45.

Nocaj A., Brandes U. Stub Bundling and Confluent Spirals for Geographic Networks – 2013.

Raposo P. Open-Source Flow Maps with Cubic Splines // North American Cartographic Information Society (NACIS) Annual Meeting (Montreal, Canada) – Montreal, 2017.

Slocum T. A., McMaster R.B., Kessler F.C., Howard H.H. Thematic Cartography and Geovisualization: Pearson New International Edition. / Pearson Education Limited, 2013. – 3 ed.

Sun S. A spatial one-to-many flow layout algorithm using triangulation, approximate Steiner trees, and path smoothing // Cartogr. Geogr. Inf. Sci. – 2019. – Vol.46., No.3. – pp. 243–259.

Сведения об авторах

Глеб Валерьевич Пинигин – студент 1 курса магистратуры кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

Тимофей Евгеньевич Самсонов – ведущий научный сотрудник кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, кандидат географических наук.

Дешифрирование кустовых площадок в различных природных зонах с помощью сверточных нейронных сетей

Развенков П.А., Каргашин П.Е.

В течение последних десяти лет наблюдается значительный рост публикаций на тему использования алгоритмов машинного обучения в дистанционном зондировании. Методы машинного обучения, решающие задачи компьютерного зрения, позволяют выделить множество абстрактных признаков и их комбинаций исходного набора данных, формирующих образ того или иного объекта, и на их основе осуществляют идентификацию нужных объектов на анализируемом изображении. Данные алгоритмы, несомненно, подходят для сегментации кустовых площадок – наиболее многочисленной группы объектов любого нефтегазового месторождения. В данной работе предпринята попытка создания сегментационных моделей на основе сверточных нейронных сетей с целью выделения кустовых площадок в различных природных зонах. При этом были проанализированы различные факторы, оказывающие влияние на качество обнаружения целевого класса объектов.

Ключевые слова: машинное обучение, сегментация, дистанционное зондирование, нефтегазовая промышленность

Interpretation of well pads in various natural zones using convolutional neural networks

Razvenkov P.A., Kargashin P.E.

Over the past ten years, there has been a significant increase in publications on the use of machine learning techniques in remote sensing. Machine learning methods intended for computer vision objectives make it possible to identify many abstract features and their combinations in the original data set. These features form image of a certain object and help us to identify necessary objects on the analyzed satellite image. These algorithms are undoubtedly suitable for segmentation of well pads – the largest group of objects of any oil and gas field. This article covers creation of segmentation models based on convolutional neural networks to identify well pads in different landscapes. At the same time, various factors affecting the detection quality of the target class of objects are analyzed.

Keywords: machine learning, segmentation, interpretation, remote sensing, oil and gas industry

Введение

Наиболее часто методы автоматизированного дешифрирования, используемые в дистанционном зондировании, опираются только на анализ спектральных характеристик местности. При этом часто целевой класс объектов обладает идентичными значениями яркости с множеством других объектов исследуемой территории, но отличается от них особенностями размещения, формой и размером. Использование геометрических характеристик при дешифрировании возможно благодаря применению сверточных нейронных сетей – одного из наиболее популярных методов, используемых в машинном обучении для решения задач распознавания образов.

Актуальность данной работы обусловлена несколькими причинами. Во-первых, данные о размещении кустовых площадках

практически отсутствуют в открытом доступе, так как принадлежат компаниям, ведущим разработку месторождения. Во-вторых, традиционные методы автоматизированного дешифрирования опираются лишь на анализ яркостных свойств изображений, поэтому не подходят для решения задачи обнаружения кустовых площадок, имеющих правильную геометрическую форму и сходных по своим яркостным характеристикам с множеством других объектов местности. В-третьих, в последнее десятилетие активно развиваются алгоритмы на основе нейронных сетей, используемые для распознавания образов, опирающиеся не только на яркостные характеристики, но и на анализ геометрии, соседства и множества других абстрактных свойств изображения.

Цель работы состоит в создании сегментационных моделей на базе различных архитектур сверточных нейронных сетей, предназначенных для выделения на космических снимках кустовых площадок нефтегазовых месторождений в различных природных зонах.

Новизна данной работы заключается в том, что в ней предлагается использовать сверточные нейронные сети, являющиеся одним из наиболее современных методов анализа изображений, используемых в мировой практике в течение последнего десятилетия [Ma et al,, 2019: Yuan et al., 2021; Kattenborn et al., 2021], но до сих пор не имеющие активного применения среди отечественных исследователей в области дистанционного зондирования.

Материалы и методы

Объектом данного исследования является наиболее многочисленная группа объектов, расположенная в пределах территории месторождения – кустовые площадки. *Кустовой площадкой* называется специальная площадка естественного или искусственного происхождения с расположенными на ней устьями скважин, а также другим технологическим оборудованием для добычи нефти и газа.

В данной работе были созданы сегментационные модели для выделения кустовых площадок месторождений нефти в пределах четырех различных природных зон.

- Тайга – Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн (Россия, ХМАО);
- Субтропические степи – Пермский нефтегазоносный бассейн (США, Техас);
- Лесостепи – Волго-Уральская нефтегазоносная провинция (Россия, Татарстан);
- Пустыни – Персидский нефтегазоносный бассейн (Кувейт).

Нейронные сети

Наиболее эффективной группой алгоритмов машинного обучения, позволяющих решать задачи распознавания образов, являются сверточные нейронные сети. Сверточная сеть представляет собой последовательность фильтров различного размера и содержания, применяемых к исходному изображению. Каждый фильтр предназначен для обнаружения на изображении определенных структур или свойств. В процессе обучения нейронной сети по тренировочному набору данных происходит подбор оптимальных значений весов каждого из фильтров таким образом, чтобы после того, как тестовое изображение будет пропущено через все фильтры, нейронная сеть могла найти на исходном изображении целевой класс объектов. Оптимальные значения весов находят с помощью различных методов оптимизации, в основе которых лежит метод градиентного спуска [Хайкин, 2006].

Для решения задач сегментации используются архитектуры, состоящие из двух частей: энкодера (кодировщика), предназначенного для выделения свойств

изображения и декодера, преобразующего выделенные свойства результат сегментации. В настоящий момент, общепринятым является подход, когда в нейронной сети в качестве энкодера используется архитектура, используемая для классификации изображений, а декодер из архитектуры *U-Net*. В данном исследовании было использовано 5 архитектур: *U-Net, ResNet50, LinkNet, VGG16* и *VGG19*.

Создание обучающей выборки

Первым этапом работы по созданию сегментационной модели является отбор обучающей выборки, на основе которой в дальнейшем будет осуществляться обучение нейронной сети. Данная операция была произведена в облачной платформе *Google Earth Engine*.

На сегодняшний день снимки со спутников Sentinel-2 обладают наибольшим пространственным разрешением среди других изображений, находящихся в свободном доступе, поэтому было принято решение использовать материалы съемки данных спутников для создания обучающей выборки.

Сначала происходит выбор области, которая будет использована для создания набора обучающих данных. Затем путем фильтрации по дате и отсутствию облачности на заданную территорию формируется изображение *Sentinel-2*. После чего вручную осуществляется векторизация кустовых площадок.

Далее в буферной зоне центроида каждого выделенного полигона случайным образом выбирается точка, вокруг которой путем обрезки исходного снимка по назначенным границам стоится изображение 128*128 пикселей. Для каждого такого элементарного изображения производится бинарная классификация. Пиксели, которые пересекаются с созданным ранее полигоном кустовой площадки, принимают значение 1, остальная территория – 0. В результате проделанных операций мы получаем множество данных для тренировки модели, где цветное изображение – это исходные данные, а бинарная классификация – трактовка данного изображения компьютером, эталон (рисунок 1).

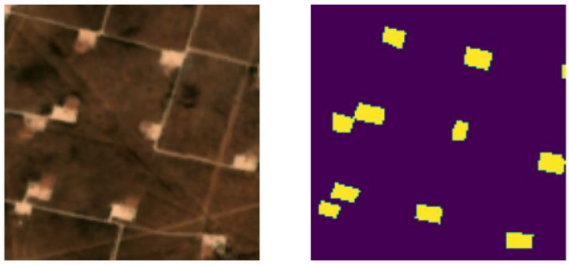


Рисунок 1 – Элемент обучающей выборки

Создание и обучение нейронной сети

Для точного выделения границ кустовых площадок был разработан скрипт на языке программирования *Python* с использованием библиотеки *TensorFlow*, разработанной компанией Google. Эта библиотека предназначена для построения и тренировки нейронных сетей с целью автоматического нахождения и классификации образов. Программирование и вычисления осуществлялись в облачном сервисе *Google Collab*, который предоставляет бесплатный доступ к своему графическому процессору *(graphics processing unit, GPU).* Использование *GPU* позволяет на порядок снизить временные затраты на обучение моделей. Примерное время обучения составляет от нескольких минут до нескольких часов. Без GPU обучение нейросети займет существенно больше времени и не позволит полноценно экспериментировать со структурой сети.

На начальном этапе происходит импорт библиотек и чтение исходных данных – множества пар изображений 128*128 пикселей, созданных ранее в *Google Earth Engine*.

Обучающее множество данных разде-

ляется на два подмножества: тренировочный и валидационный наборы данных. Тренировочный набор данных используется для обучения модели, валидационный – для ее проверки. Как правило, объем тестовой выборки составляет 15–30 % от обучающей.

Далее происходит инициализация архитектуры нейронной сети, задается функция активации и метод оптимизации. Следующим шагом происходит создание функции, осуществляющей, аугментацию набора исходных данных. Под аугментацией понимается искусственное увеличение тренировочного набора данных за счет незначительного поворота, отражения, смещения исходных изображений и их масок. Данная операция осуществляется с целью предотвращения переобучения модели. На каждой эпохе обучения нейронной сети «показываются» не одни и те же изображения, а их преобразованные варианты.

После задания аугментационной функции переходим к собственно процессу обучения модели, на вход которой подается несколько наборов данных и параметров: тренировочная и валидационная выборки, количество эпох обучения. Количество эпох определяет, сколько раз модель будет видеть весь набор тренировочных данных в процессе обучения. Важно правильно подобрать количество эпох для обучения. Если эпох будет слишком мало, то модель не научится находить общие признаки объектов и отличать их от окружающего пространства. И, наоборот, слишком длительное обучение модели может привести к переобучению.

В конце каждой эпохи происходит вызов функции аугментации, которая несколько перестраивает набор тренировочных данных, по которому будет обучаться следующая эпоха. Также по окончании каждой эпохи обучения происходит вычисление метрики *Dice Loss* [Milletari et al., 2016] для тренировочного и валидационного наборов данных. Коэффициент вычисляется по следующей формуле:

$$D = 1 - \frac{2*\sum_i^N p_i g_i}{\sum_i^N {p_i}^2 + \sum_i^N {g_i}^2} \qquad (1)$$

где g_i – значение i-го пиксела маски изображения, p_i – значение i-го пиксела результата сегментации изображения. p_i принимает два значения: либо 0, если пиксель не относится к заданному классу объектов, либо 1, если пиксель относится к заданному классу. g_i – представляет собой вероятность отношения пикселя к заданному классу, которая изменяется от 0 до 1.

Таким образом, чем больше соответствие пикселей размеченного человеком набора изображений с результатом сегментации того же набора, тем ближе значение D к 0 (рисунок 2). То есть, чем меньше значение данного параметра, тем лучше результат сегментации.

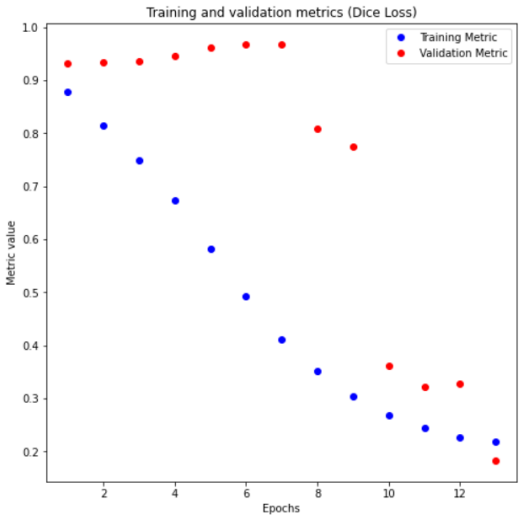


Рисунок 2 – Значение метрики *Dice Loss* в процессе обучения модели

Следующий этап работы – предсказание обученной моделью положения кустовых площадок по космическому снимку. Предварительно необходимо осуществить подготовку данных. Снимок, предназначенный для сегментации, следует разбить на элементарные изображения 128×128×3. Это логично с вычислительной точки зрения –

проще обработать много маленьких изображений, чем одно большое. В то же время исходные данные и материалы, на основе которых осуществляется предсказание, должны иметь одинаковый размер в пикселях.

Набор элементарных изображений размерами 128×128×3 подается «на вход» модели, и она возвращает набор одноканальных сегментированных изображений 128×128*×1, из которых впоследствии формируется единое изображение исходного размера. Значения пикселей сегментированного изображения принадлежат отрезку от 0 до 1 и означают вероятность отношения того или иного пиксела к классу кустовых площадок.

Финальным этапом является конвертация полученного изображения со значениями пикселей от 0 до 1 в векторный формат. Для этого задается пороговое значение пиксела, по которому происходит конвертация растра в полигональный класс объектов.

Одним из самых распространенных подходов количественной оценки качества сегментации является формирование матрицы ошибок (рисунок 3) и вычисления на ее основе метрик: достоверности (*precision*), полноты (*recall*) и F-меры (F_1-*score*).

Выделяются два типа ошибок классификации: выделение лишних объектов и не выделение нужных объектов. Данные ошибки влияют на достоверность и полноту результата, которые вычисляются по следующим формулам:

$$precision = \frac{\text{ИП}}{\text{ИП+ЛП}} \quad (2)$$

$$recall = \frac{\text{ИП}}{\text{ИП+ЛО}} \quad (3)$$

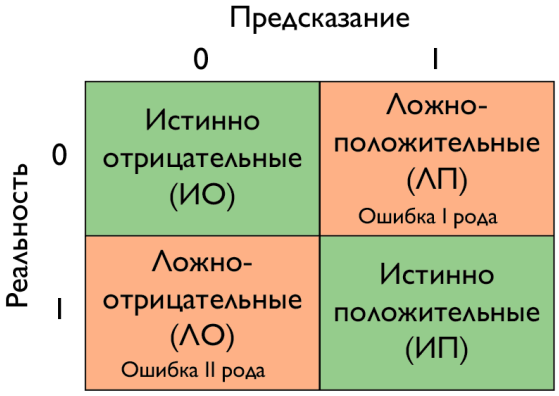


Рисунок 3 – Матрица ошибок

F-мера достигает максимума при значениях полноты и достоверности, равным единице, и близка к нулю, если один из аргументов близок к нулю.

$$Fscore = \frac{2*recall*precision}{recall+precision} \quad (4)$$

Для вычисления метрик, отражающих качество сегментации, производилась процедура суммирования растров «ручной» и автоматической сегментации изображений. Таким образом, значения пикселей результирующих изображений лежали в диапазоне от 0 до 3 включительно (рисунок 4): 0 – пиксели, относящиеся к классу прочих территорий на обоих изображениях (*истинно отрицательные, ИО*); 1 – пиксели, ошибочно отнесенные нейронной сетью к классу кустовых площадок (*ложно положительные, ЛП*); 2 – пиксели кустовых площадок, которые не были выделены сегментационной моделью (*ложно отрицательные, ЛО*); 3 – пиксели, правильно отнесенные моделью к классу кустовых площадок (*истинно положительные, ИП*).

На основе полученных значений количества пикселей, относящихся к классам *ИО, ЛП, ЛО и ИП* можно было бы сразу рассчитать метрики для попиксельной оценки качества. Но данные показатели учитывали бы как случаи ошибок выделения границ кустовых площадок, когда сегментационная модель выделяет недостаточную или избыточную площадь кустовой площадки,

так и случаи ложного обнаружения и необнаружения целых кустовых площадок.

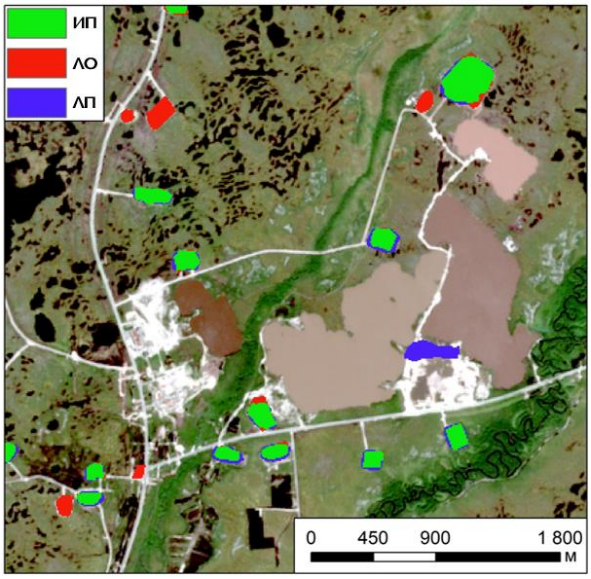


Рисунок 4 – Результат суммирования «ручной» и автоматической сегментации

Поэтому показатели *precision, recall* и *F-мера*, рассчитанные на основе количества пикселей, относящихся к различным классам матрицы ошибок, не позволили бы судить ни о качестве выделения границ кустовых площадок, ни о площадной ошибке обнаружения отдельных кустовых площадок.

Поэтому для дальнейшей оценки результатов сегментации изображений было принято решение разделить пиксели, относящиеся к классам *ЛП* и *ЛО* на группы. Те ошибочные пиксели (*ЛП и ЛО*), которые граничат с пикселями класса *ИП*, использовались для оценки качества выделения границ кустовых площадок (рисунок 5а). Прочие пиксели классов *ЛП и ЛО* при расчете метрик качества не учитывались, так как они относятся к изолированным полигонам, не имеющим отношения к верно выделенным кустовым площадкам, и не позволяют судить о правильности определения формы целевого класса объектов.

Для оценки результатов сегментации с точки зрения площадной ошибки обнаружения кустовых площадок использовались пиксели, относящиеся к классам *ЛП и ЛО,* не граничащие с пикселями верно выделенных кустовых площадок (рисунок 5б).

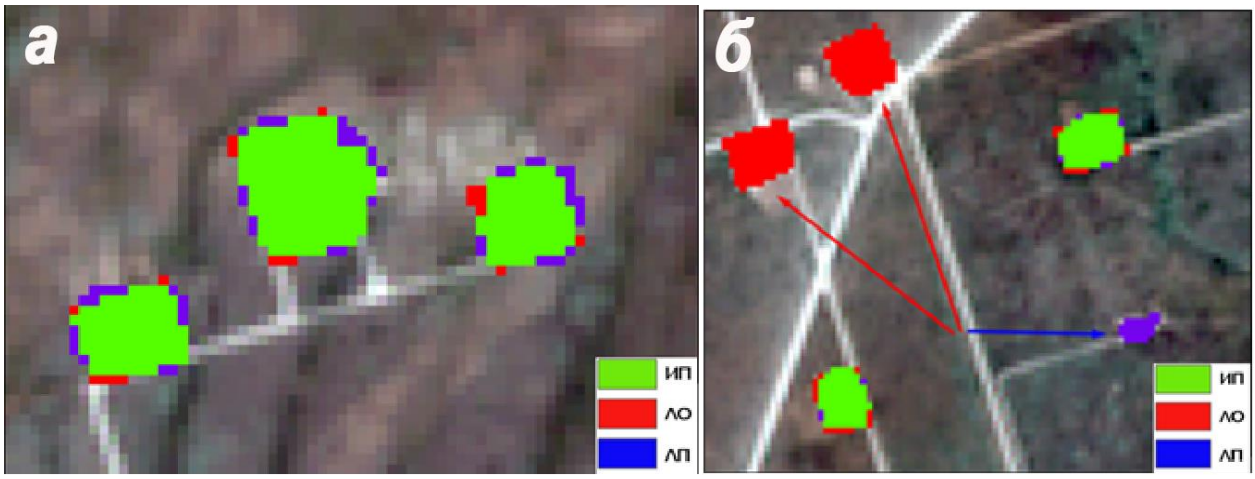


Рисунок 5 – Виды ошибок сегментации: а) ошибки выделения границ; б) ошибки обнаружения кустовых площадок

Результаты

Для каждой природной зоны были отобраны тестовые изображения Sentinel-2, фрагменты которых не участвовали в формировании обучающей выборки для нейросетей. Данные изображения были использованы для проверки работы полученных моделей.

На начальном этапе экспериментальной работы была произведена оценка влияния отдельных параметров сверточных нейронных сетей на качество результатов

сегментации. В качестве основного показателя, характеризующего качество результатов, была выбрана F-мера.

Были проанализированы результаты сегментации тестовых изображений для различных природных зон при условии использования различных методов оптимизации: *SGD, Adam, Adamax, Adadelta, Adagrad и RMSProp.* Наилучшие результаты сегментации были показаны при использовании метода *Adam.*

Еще одним фактором, который может оказывать влияние на качество сегментации, является вариант синтеза изображения. Для поиска наилучшего варианта синтеза было составлено 20 сочетаний по 3 из 6 каналов (2, 3, 4, 6, 8 и 12) космического снимка, расположенных видимом, ближнем инфракрасном и среднем инфракрасном диапазонах, спутника Sentinel-2.

Порядок расположения каналов в изображении в случае машинного обучения не имеет значения, в отличие от визуального дешифрирования. По сути, при изменении порядка расположения каналов в машинном обучении мы меняем местами лишь слагаемые в уравнении.

Для каждого из описанных выше сочетаний были составлены обучающие выборки и было произведено обучение нейронных сетей на базе, использованных ранее архитектур (*LinkNet, U-Net, ResNet, VGG16 и VGG19*) для четырех природных зон: тайга (Западная Сибирь), лесостепи (Татарстан), субтропические степи (Техас) и пустынь (Кувейт). Полученные модели были применены к тестовым изображениям.

Также в ходе экспериментальной работы для обучения нейронных сетей использовались два набора тренировочных данных: простой и дополненный. Дополненный набор тренировочных данных отличается от простого тем, что содержит изображения, на которых отсутствуют кустовые площадки. Казалось, что присутствие в обучающей выборке «пустых» изображений должно минимизировать количество ошибочно выделяемых объектов, так как модели в процессе обучения показывается изображения, на которых отсутствуют кустовые площадки.

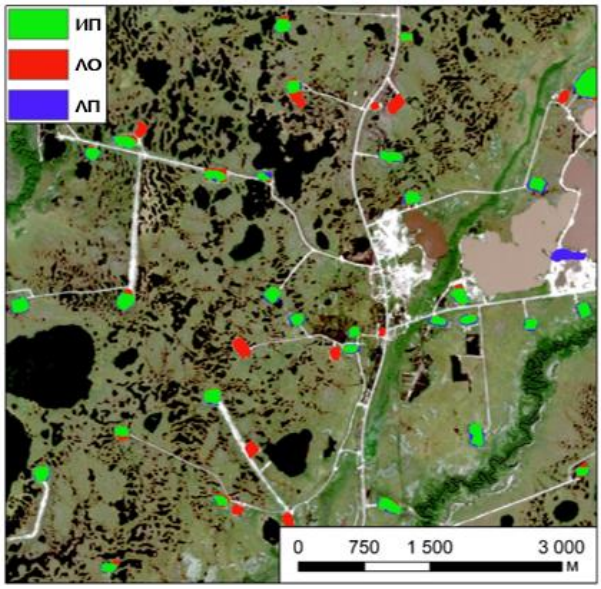


Рисунок 6 – Фрагмент результата сегментации, полученного моделью, построенной на базе архитектуры *ResNet50*

Полученные результаты сегментации на базе различных архитектур нейронных сетей для каждой из анализируемых природных зон не позволили подтвердить наличие такой зависимости. На финальном этапе исследования была проведена оценка влияния архитектуры нейронной сети на результат сегментации изображений в исследуемых природных зонах.

Тайга

Первой природной зоной, для которой была осуществлена сегментация тестовых изображений, являлась Западно-Сибирская тайга (рисунок 6). Полученный результат можно назвать приемлемым как с точки зрения качества обнаружения кустовых площадок, так и сточки зрения качества выделения их границ (таблицы 1, 2).

Наилучшие модели характеризуются

значениями F-меры в районе 80%, что является достаточно высоким показателем качества. Лучшие результаты сегментации были получены сегментационными моделями на базе архитектур *ResNet50* и *U-Net.*

Таблица 1 – Оценка качества обнаружения кустовых площадок в таежной зоне (WWP – модели, обученные по дополненному набору данных)

Используемая архитектура	Выделено верно (ИП)	Выделено ошибочно (ЛП)	Не выделено (ЛО)	Достоверность, %	Полнота, %	F-мера
LinkNet_WWP	*188371*	*64238*	*15422*	*74,57*	*92,43*	*82,55*
ResNet50_WWP	*134771*	*28491*	*46735*	*82,55*	*74,25*	*78,18*
ResNet50	*140544*	*43580*	*42060*	*76,33*	*76,97*	*76,65*
U-Net	*143562*	*76341*	*20042*	*65,28*	*87,75*	*74,87*
U-Net_WWP	*146345*	*67543*	*36077*	*68,42*	*80,22*	*73,85*

Таблица 2. Оценка качества выделения границ кустовых площадок в таежной зоне (WWP – модели, обученные по дополненному набору данных)

Используемая архитектура	Выделено верно (ИП)	Выделено ошибочно (ЛП)	Не выделено (ЛО)	Достоверность, %	Полнота, %	F-мера
ResNet50_WWP	*134771*	*26529*	*34377*	*83,55*	*79,68*	*81,57*
ResNet50	*140544*	*38097*	*33279*	*78,67*	*80,85*	*79,75*
U-Net	*143562*	*21122*	*52279*	*87,17*	*73,31*	*79,64*
LinkNet	*138864*	*33276*	*45527*	*80,67*	*75,31*	*77,90*
U-Net_WWP	*146345*	*55471*	*33461*	*72,51*	*81,39*	*76,70*

Стоит отметить, что наибольшее количество ошибочно выделенных полигонов относилось к широким участкам грунтовых дорог, прочим объектам инфраструктуры месторождения, а также к прирусловым отмелям.

Степи

Сегментационные модели, предназначенные для обнаружения кустовых площадок в пределах субтропических степей, характерных для Пермского нефтегазоносного бассейна (Техас, США), позволили получить наилучшие показатели качества сегментации среди по сравнению с остальными территориями (таблицы 3, 4). Полученные результаты характеризуются гораздо меньшим количеством ошибочно обнаруженных кустовых площадок, по сравнению с результатами, показанными при сегментации изображений для таежной зоны. Данный факт связан прежде всего с тем, что кустовые площадки, характерные для данной территории, практически идентичны по форме и размеру, что позволило сегментационным моделям обучиться наиболее качественно.

Всеми моделями был показан результат высокого качества, но на фоне других выделялись модели, построенные на базе архитектур VGG16 и VGG19 (рисунок 7).

Лесостепи

Большинство кустовых площадок, характерных для лесостепной зоны Ромашкинского месторождения (Татарстан, Россия) расположены в пределах лесных массивов (рисунок 8), представляют собой прямоугольные вырубки небольшой площади.

Результат сегментации, полученный для данной природной зоны, хуже, по сравнению с примерами выше (таблицы 5, 6). Это объясняется тем, что данная территория характеризуется большим разнообра-

зием структур на снимке и значительной вариацией формы и размеров кустовых площадок.

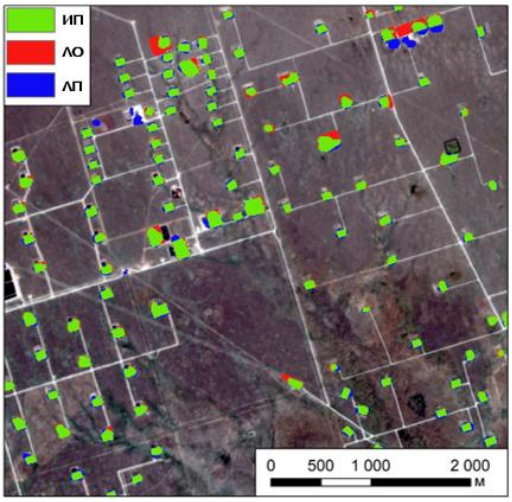


Рисунок 7 – Фрагмент результата сегментации, полученного моделью, построенной на базе архитектуры *VGG16*

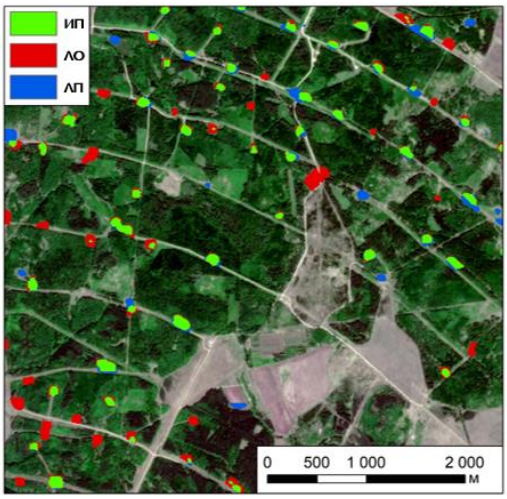


Рисунок 8 – Фрагмент результата сегментации, полученного моделью, построенной на базе архитектуры *U-Net*

Таблица 3. Оценка качества обнаружения кустовых площадок в зоне субтропических степей

Используемая архитектура	Выделено верно (ИП)	Выделено ошибочно (ЛП)	Не выделено (ЛО)	Достоверность, %	Полнота, %	F мера
VGG16	*180408*	*17037*	*29526*	*91,37*	*85,94*	*88,57*
VGG19	*224141*	*50829*	*12642*	*81,51*	*94,66*	*87,60*
U-Net	*218184*	*38327*	*29828*	*85,06*	*87,97*	*86,49*
ResNet50	*181156*	*21268*	*43739*	*89,49*	*80,55*	*84,79*
VGG16_WWP	*176845*	*20484*	*45500*	*89,62*	*79,54*	*84,28*

Таблица 4. Оценка качества выделения границ кустовых площадок в зоне субтропических степей

Используемая архитектура	Выделено верно (ИП)	Выделено ошибочно (ЛП)	Не выделено (ЛО)	Достоверность, %	Полнота, %	F мера
ResNet_WWP	*191434*	*28690*	*42114*	*86,97*	*81,97*	*84,39*
VGG19	*224141*	*44344*	*48343*	*83,48*	*82,26*	*82,87*
ResNet50	*181156*	*18741*	*60231*	*90,62*	*75,05*	*82,10*
VGG16_WWP	*176845*	*16260*	*62781*	*91,58*	*73,80*	*81,73*
VGG19_WWP	*160535*	*10342*	*66138*	*93,95*	*70,82*	*80,76*

Но стоит отметить, что сегментационные модели усвоили основное свойство кустовых площадок, характерных для данной территории, что они должны быть расположены в пределах лесных массивов. Поэтому ошибочно выделенные кустовые площадки отсутствуют за пределами лесной территории.

Таблица 5. Оценка качества обнаружения кустовых площадок в лесостепной зоне

Используемая архитектура	Выделено верно (ИП)	Выделено ошибочно (ЛП)	Не выделено (ЛО)	Достоверность, %	Полнота, %	F мера
U-Net	*27237*	*7777*	*19416*	*77,79*	*58,38*	*66,70*
U-Net_WWP	*25996*	*10646*	*15923*	*70,95*	*62,01*	*66,18*
LinkNet_WWP	*31214*	*22231*	*14505*	*58,40*	*68,27*	*62,95*
LinkNet	*24673*	*16567*	*13364*	*59,83*	*64,87*	*62,25*
vgg19_WWP	*26542*	*22356*	*12710*	*54,28*	*67,62*	*60,22*

Таблица 6. Оценка качества выделения границ кустовых площадок в лесостепной зоне

Используемая архитектура	Выделено верно (ИП)	Выделено ошибочно (ЛП)	Не выделено (ЛО)	Достоверность, %	Полнота, %	F мера
LinkNet_WWP	*31214*	*10398*	*10440*	*75,01*	*74,94*	*74,97*
U-Net	*27237*	*8963*	*9506*	*75,24*	*74,13*	*74,68*
VGG19_WWP	*26542*	*4018*	*16907*	*86,85*	*61,09*	*71,73*
U-Net_WWP	*25996*	*6338*	*14240*	*80,40*	*64,61*	*71,64*
ResNet50	*18312*	*2871*	*11778*	*86,45*	*60,86*	*71,43*

Пустыни

Сегментационные модели, предназначенные для обнаружения кустовых площадок в пределах пустынь, показали неудовлетворительные результаты как с точки зрения ошибок обнаружения отдельных кустовых площадок, так и с точки зрения качества выделения границ (таблицы 7, 8).

Таблица 7. Оценка качества обнаружения кустовых площадок в зоне пустынь

Используемая архитектура	Выделено верно (ИП)	Выделено ошибочно (ЛП)	Не выделено (ЛО)	Достоверность, %	Полнота, %	F-мера
U-Net	*28974*	*16654*	*40328*	*63,50*	*41,81*	*50,42*
U-Net_WWP	*27854*	*24311*	*36840*	*53,40*	*43,05*	*47,67*
ResNet50	*17857*	*3971*	*51123*	*81,81*	*25,89*	*39,33*
ResNet50_WWP	*19326*	*7449*	*52355*	*72,18*	*26,96*	*39,26*
LinkNet	*18209*	*6135*	*51169*	*74,80*	*26,25*	*38,86*

Таблица 8. Оценка качества выделения границ кустовых площадок в зоне пустынь

Используемая архитектура	Выделено верно (ИП)	Выделено ошибочно (ЛП)	Не выделено (ЛО)	Достоверность, %	Полнота, %	F-мера
U-Net	*28974*	*8684*	*12387*	*76,94*	*70,05*	*73,33*
ResNet50	*17857*	*3028*	*12709*	*85,50*	*58,42*	*69,41*
LinkNet	*18209*	*4264*	*12311*	*81,03*	*59,66*	*68,72*
LinkNet_WWP	*16855*	*5572*	*11223*	*75,15*	*60,03*	*66,75*
U-Net_WWP	*27854*	*10856*	*16995*	*71,96*	*62,11*	*66,67*

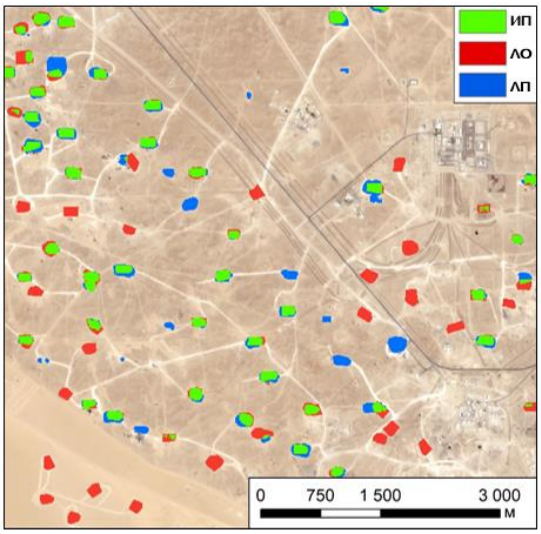


Рисунок 9 – Фрагмент результата сегментации, полученного моделью, построенной на базе архитектуры *U-Net*

Еще на этапе формирования тренировочных выборок для обучения моделей возникали большие трудности в обнаружении кустовых площадок без применения дополнительных данных сверхвысокого разрешения, поэтому такой результат сегментации ожидаем. Наилучший результат был получен моделью на базе архитектуры U-Net, но даже он очень далек от тех результатов, которые были показаны сегментационными моделями для остальных природных зон (рисунок 9).

Сегментационные модели характеризуются удовлетворительным качеством выделения границ, но при этом отличаются высокой долей ошибок первого и второго рода при обнаружении отдельных кустовых площадок.

Выводы

В рамках проведенных работ были выделены основные характеристики, оказывающие влияние на качество сегментации. Экспериментально было установлено, что наилучшие результаты сегментации кустовых площадок получаются при использовании метода оптимизации *adam*. В ходе исследования был проведен ряд экспериментов, позволивших сделать вывод о том, что синтез изображений не оказывает значимого воздействия на результат сегментации. Также в отличие от визуального дешифрирования в случае использования сверточных нейронных сетей порядок каналов не влияет на результат сегментации.

Использование набора тренировочных данных, дополненного изображениями, на которых отсутствуют кустовые площадки, не позволило повысить достоверность обнаружения целевого класса объектов. При этом, стоит отметить, что модели, обученные по дополненному набору данных, отличались меньшими значениями полноты результатов сегментации, по сравнению с моделями, обученными по простому набору тренировочных данных. Наилучшие результаты сегментации практически во всех случаях были показаны моделями на базе архитектур *ResNet50, LinkNet* и *U-Net*. Модели на базе архитектур *VGG16* и *VGG19* для всех рассмотренных природных зон, кроме субтропических степей Техаса, показали неудовлетворительный результат.

Подводя итоги анализа полученных результатов сегментации, можно с уверенностью сказать, что использование алгоритмов сверточных нейронных сетей для сегментации изображений с целью выделения кустовых площадок в пределах Западно-Сибирского (тайга) и Пермского (субтропические степи) нефтяных бассейнов является целесообразным. Так как наилучшие модели, обученные по сравнительно небольшим наборам тренировочных данных, позволили получить результат, который характеризуется как высокой точностью выделения границ, так и низкой долей ошибок в обнаружении кустовых площадок. Модели, использованные для сегментации территории Ромашкинского месторождения показали результат более низкого качества, который отличается менее достоверным выделением границ кустовых площадок и высокой долей ошибочно невыделенных

объектов. При этом наилучшие результаты сегментации, полученные для данной территории, в любом случае превосходит применение традиционных алгоритмов автоматизированного дешифрирования, опирающихся лишь на яркостные свойства поверхности. Что касается применения моделей нейронных сетей для сегментации кустовых площадок в пределах пустынных территорий, то оно нецелесообразно. Низкое качество полученного результата может быть объяснено несколькими причинами. Во-первых, даже при визуальном дешифрировании часто нельзя однозначно отнести ту или иною территорию к классу кустовых площадок. Для более точного выделения требуются дополнительные данные сверхвысокого пространственного разрешения. По сравнению с остальными типами территории кустовые площадки, расположенные в пределах пустынь, обладают наименьшей контрастностью и значительной размытостью границ.

Качество получаемого результата в дальнейшем может быть повышено за счет:

- Увеличения объема обучающей выборки;
- Использования в обучающей выборке изображений, на которых зафиксировано как можно большее количество типов окружения кустовых площадок для каждой из природных зон;
- Ручной доработки архитектур нейронных сетей;
- Более тонкой настройки площадных фильтров, предназначенных для минимизации ошибочно выделенных полигонов.

В заключение хочется отметить, что использование нейронных сетей с целью сегментации кустовых площадок в пределах значительных по площади территорий (Пермский и Западно-Сибирский бассейны) является оправданным, главным образом, за счет значительного сокращения временных затрат. На ручную векторизацию кустовых площадок в пределах каждого тестового изображения было потрачено от 3 до 5 часов. В то время как у сегментационных моделей уходило на эту же задачу не более минуты.

Список литературы

Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006 – 1104 с.: ил. – Парал. тит. англ.

Kattenborn T., Leitloff J., Schiefer F., Hinz, S. Review on Convolutional Neural Networks (CNN) in Vegetation Remote Sensing. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2021. – Vol. 173. – pp. 24-49.

Ma L., Y. Liu, Xueliang Zh.,Ye Y., Gaofei Y., Brian J. Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2019. Vol. 152. – pp. 166-177. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015.

Milletari F., Navab N., Ahmadi S-A. V-Net: Fully Convolutional Neural Networks for Volumetric Medical Image Segmentation // 2016 Fourth International Conference on 3D Vision (3DV). – 2016. – pp. 565-571.

Yuan X., Shi J., Gu L. A review of deep learning methods for semantic segmentation of remote sensing imagery // Expert Systems With Applications. – 2021. – Vol. 169. – 114417.

Сведения об авторах

Павел Александрович Развенков – выпускник кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Павел Евгеньевич Каргашин – доцент кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук.

Картографирование изменения транспортной доступности районов Москвы

Ромах Е.А., Карпачевский А.М.

Работа посвящена изменениям транспортной доступности районов Москвы с 2012 по 2022 год. За последние десятилетие было проведено несколько реформ городского общественного транспорта Москвы: были частично отменены и переведены на автобусы малого и среднего класса городские маршрутные такси, создана система «Магистраль», отменено маршрутное движение троллейбусов, введены десятки маршрутов электробусов, протяженность линий метрополитена возросла в полтора раза, а всего внеуличного транспорта вдвое. Все эти изменения привели к кардинальному перестроению системы общественного транспорта Москвы. Несмотря на все изменения именно метро является доминирующим видом транспорта по количеству пассажиров. В рамках работы оценивались изменения двух наиболее важных для пассажиров параметров сети: времени достижимости станций метро и центра города. Основные изменения транспортной доступности связаны с увеличением протяженности сети метро, городской наземный транспорт почти не влияет на доступность станций, а создание сети «Магистраль» не изменило положение наземного транспорта с подвозящего на основной.

Ключевые слова: Картографирование транспортных сетей, транспорт Москвы, транспортная доступность.

Mapping of transport accessibility changes in districts of Moscow

Romakh E.A., Karpachevskiy A.M.

This research article describes changes of transport accessibility in municipal districts of Moscow city for the period of 2012–2022. For the last ten years there are a lot of changes in Moscow transportation system. By these years minibuses were replaced by buses, trolleybuses were completely removed. Despite of these the "Magistral" bus system was created; part of the trolleybuses was replaced by electro buses. Length of metro system has been growing all the time and now length of the metro is approximately 600 km. All these changes changed transport system of Moscow very seriously. Metro is the main transport of Moscow by passenger flow. There are two main indices which are calculated: accessibility of metro stations and accessibility of city center. The main changes occurred because of metro system growth. Impact of ground transport is almost unchanged despite the new "Magistral" system.

Keywords: Mapping of transport system, transport of Moscow, transport accessibility.

Введение

В период с 2012 по 2022 год в транспортной системе Москвы произошло множество изменений: почти полностью были переведены на автобусы среднего и большого класса вместимости маршрутные такси, были отменены все маршруты троллейбусов, создана электробусная сеть города, была введена и несколько раз реформирована система «Магистраль», протяженность линий скоростного внеуличного транспорта Москвы возросла с 313 до 629 км.

Основные перевозки в транспортной сети города осуществляет метрополитен:

на его долю приходится около 48 % пассажиропотока общественного транспорта в 2022 году [Две…]. Автобусы, электробусы и трамваи часто используются в качестве подвозящего транспорта. В связи с этим исследование транспортной доступности станций метрополитена является важной задачей, позволяющей оценить качество реформ наземного транспорта.

В данном контексте стоит отметить реформу маршрутной сети наземного электротранспорта «Магистраль», которая должна была изменить роль автобусов и электробусов и предоставить альтернативу метро при перемещениях по городу в диаметральном направлении. Однако реформа на момент написания статьи была завершена лишь в части Южного и Юго-Восточного административных округов, в связи с чем ее влияние в полной мере оценить нельзя.

Настоящее исследование направлено на картографирование и анализ изменения транспортной доступности станций метро за период с 2012 по 2022 год (в пределах жилой застройки города).

Материалы и методы

В рамках исследования изучалась транспортная доступность только внутригородского транспорта:

- Метро
- Внутригородской электрички (МЦК)
- Монорельса
- Автобусов и электробусов
- Трамваев

Именно эти виды транспорта являются основой перевозок внутри административных границ Москвы, межрегиональные автобусы и троллейбусы между Москвой и Московской областью, а также Московские Центральные Диаметры выполняют функцию межрегиональных перевозок и почти не представлены во внутригородском пассажиропотоке [Портал…], в связи с чем они не используются при создании сетевых наборов данных и подсчете показателей транспортной доступности.

Для исследования использовались данные о маршрутно-транспортной сети из Портала открытых данных Правительства Москвы [Портал…], OSM [OpenStreetMap…], сервиса Яндекс.Карты [Яндекс…], Данные о численности населения Москвы [Численность…].

Данные о маршрутной сети городского транспорта требуют предварительной обработки, так как они представлены в виде таблицы, в которой остановки сгруппированы в алфавитном порядке с привязкой по маршрутам. Для ее обработки и приведения к необходимому для дальнейших манипуляций виду был создан инструмент на языке программирования Python.

Первым рассматриваемым показателем является доля людей, проживающих в некоторой области доступности вокруг станций метро. Для расчета данного показателя создается сетевой набор данных в среде ArcGIS из маршрутов наземного общественного транспорта, по которому строится область обслуживания вокруг станций метро с буферной зоной шириной 500 м. Было решено использовать три градации для транспортной доступности:

- 5-минутная область обслуживания показывает расстояние между остановками и станциями метро, а также доступность для очень коротких (менее 1 км) подвозящих маршрутов;
- 10-минутная область обслуживания охватывает короткие поездки до 1,5 км вокруг станций метро;
- 15-минутная область обслуживания охватывает поездки длинной до 2,5 км.

Вторым показателем является количество людей, которое может достичь центра города за определенное количество минут. В данном исследовании центром города является область рядом со станцией метро

Охотный Ряд. Были созданы три области обслуживания: 30, 45 и 60 минут от центра.

Третьим показателем является доля жителей муниципалитетов, проживающих в пределах пешеходной доступности станций метро. Под пешеходной доступностью использовалось пространство, которое можно было достигнуть от станции метро за 10 минут [Barthelemy, 2018].

Для локализации населения в областях жилой застройки из полигонов муниципальных районов были исключены территории, занятые промышленностью, лесопарками, водными объектами. Внутри оставшихся полигонов случайным образом создавалось такое количество точек, чтобы расстояние между ними было приблизительно равно 200 м. В эти точки был передан атрибут населения, полученного в результате целочисленного деления числа жителей района на число точек зданий.

Данные по транспортной сети Москвы были взяты с портала открытых данных Правительства Москвы [Портал…]. Они представлены в виде xlsx таблиц, которые содержат информацию о координатах остановок и проходящих через них маршрутов. Для дальнейшего использования необходимо клонировать точки остановок таким образом, чтобы каждому объекту соответствовал один маршрут. В таком случае одна физическая остановка может быть представлена в виде множества точечных объектов, каждый из которых имеет лишь один маршрут. Данный способ представления позволяет автоматизировать составление сети при помощи Python библиотеки ArcPy.

Для построения линий транспортной сети использовалась дорожная сеть OpenStreetMap, из которой были убраны все неавтомобильные дороги (*highway = 'steps'* и подобные), а также дороги класса service, так как они чаще всего являются внутриквартальными проездами.

Следующим этапом является создание линий транспортной сети, в рамках которого был создан инструмент Python toolbox, который автоматически соединяет точки по маршруту. Так как исходные данные никак не упорядочены и портал открытых данных не предоставляет информацию о начальных и конечных точках, то они находятся путем создания матрицы «источник – назначение», с помощью которой в качестве конечных выбираются точки с наибольшим расстоянием между ними. Далее решается задача поиска кратчайшего пути между всеми точками, и получившаяся геометрия добавляется в слой векторных данных.

Далее создавался класс объектов с соединениями между остановками, которые согласовывали маршрутную сеть наземного транспорта и станции метро. Всем видам линейных объектов задавался атрибут скорости в метрах в минуту. Для наземного транспорта данный показатель составил 266 м/мин [Яндекс…] для метро 688 м/мин. Для пешеходных маршрутов было установлено значение в 50 метров в минуту, так как в него заложено не только время подхода, но и время спуска на станцию. Данное значение использовалась в качестве знаменателя для вычисления времени прохода по линейному сегменту.

На основе использования сетевого набора данных нами был создан инструмент по вычислению значений количества людей, проживающих в пределах 30, 45 и 60 минут от условного центра города. Данный инструмент создает три области обслуживания вокруг сети. Далее находятся точки населения, которые расположены в каждой из этих областей. В результате данные по численности населения каждой точки внутри зоны обслуживания суммируются.

Второй инструмент позволяет определить долю населения, которая может добраться на общественном транспорте

до ближайшей станции метро. Здесь также решается задача построения областей обслуживания, однако в качестве точек притяжения выступает не центр города, а станции метро. В результате находится пересечение слоя с точками и слоя с областями обслуживания и население суммируется по районам. Этот атрибут передается в слой с жилой застройкой.

Третий инструмент позволяет определить долю жителей, проживающих в десятиминутной зоне вокруг станций метро. Его алгоритм аналогичен алгоритму вычисления доли населения, проживающей в области обслуживания общественным транспортом, но входным параметром является сетевой набор данных для пешеходов.

Эти три инструмента позволили автоматизировать построение карт для анализа транспортной сети Москвы, но также могут использоваться и для исследования других городов. Для этого был создан и размещен в репозитории GitHub набор инструментов Python Toolbox для ArcGIS Desktop [GitHub…].

Результаты

В данных присутствуют два аномальных года: 2014 и 2019 (рисунок 1). В процессе анализа исходных данных было выявлено большое количество выбросов. Иногда при переименовании маршрутов Департамент транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры Москвы [Численность…], ответственный за набор данных с остановками, не удалял остановки, которые более не относятся к маршруту, а иногда наоборот, добавлял не все остановки на новый маршрут. Данные выбросы на графике с большой долей вероятности возникают именно по этой причине. Поэтому анализироваться будут данные с 2015 по 2022 гг. за исключением 2015 г.

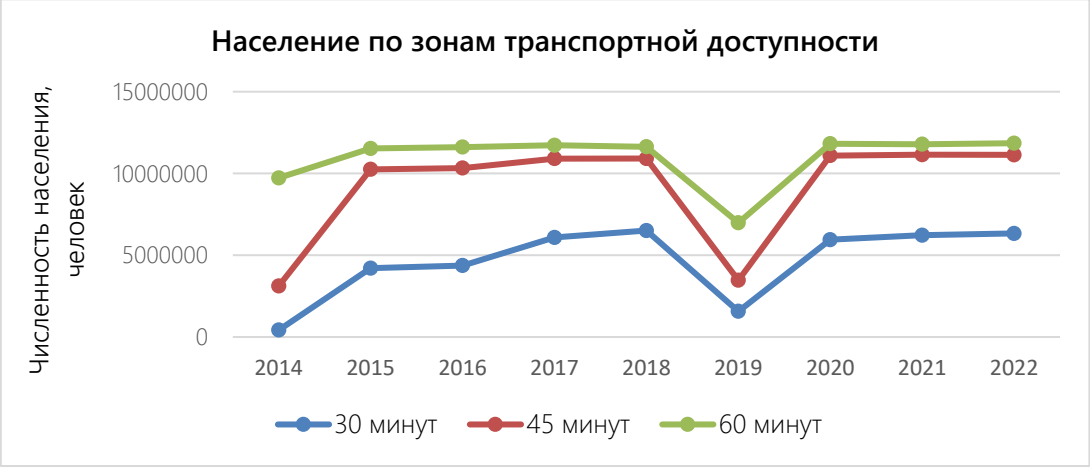


Рисунок 1 – Диаграмма распределения населения по зонам транспортной доступности

Итого с 2015 по 2022 г. произошли следующие изменения: численность населения в области 30 минутной доступности выросла с 4,208 млн человек в 2015 г. до 6,332 млн человек в 2022 (увеличение почти на 50 %). Такой резкий скачок связан с продлением Люблинско-Дмитровской линии метро на севере города, а также с вводом Солнцевской линии, которая улучшила транспортное сообщение для жителей ЗАО. Изменение численности в 45 минутной доступности от центра не так велико, как для 30 минутной доступности с 10,248 млн человек в 2015 г до 11,113 млн в 2022 г. (увеличение на 8,5 %). Изменение численности населения в зоне 60-минутной транспортной доступности еще меньше: с 11,526 млн оно изменилось до 11,847 млн (увеличение на 2,7 %).

Резкие скачки доступности центра связаны с вводом линий метро, причем в зоне часовой доступности центра проживает более 93 % всего населения Москвы. Также можно сделать вывод, что реформы наземного транспорта, даже введение десятков магистральных маршрутов, никак не влияют на транспортную доступность центра города: реформа «Магистрали» в 2021 году дала прибавку населения в зоне получасовой доступности на 1,7 % от значений на начало года, или менее 1 % от всего населения города.

В результате исследования можно сказать, что в целом произошел рост численности населения, проживающего близко к метро. Зона пятиминутной транспортной доступности при особенностях исходных данных по большому счету показывает дальность остановок от станций метро (рисунок 2), и это расстояние увеличилось на половине территории города, а на другой половине оно сократилось, в абсолютном большинстве муниципалитетов различия составляют до 20 % от начальных значений. Анализируя исходные данные, можно сказать, что остановки переносились каждый год, причем часто на довольно большие расстояния.

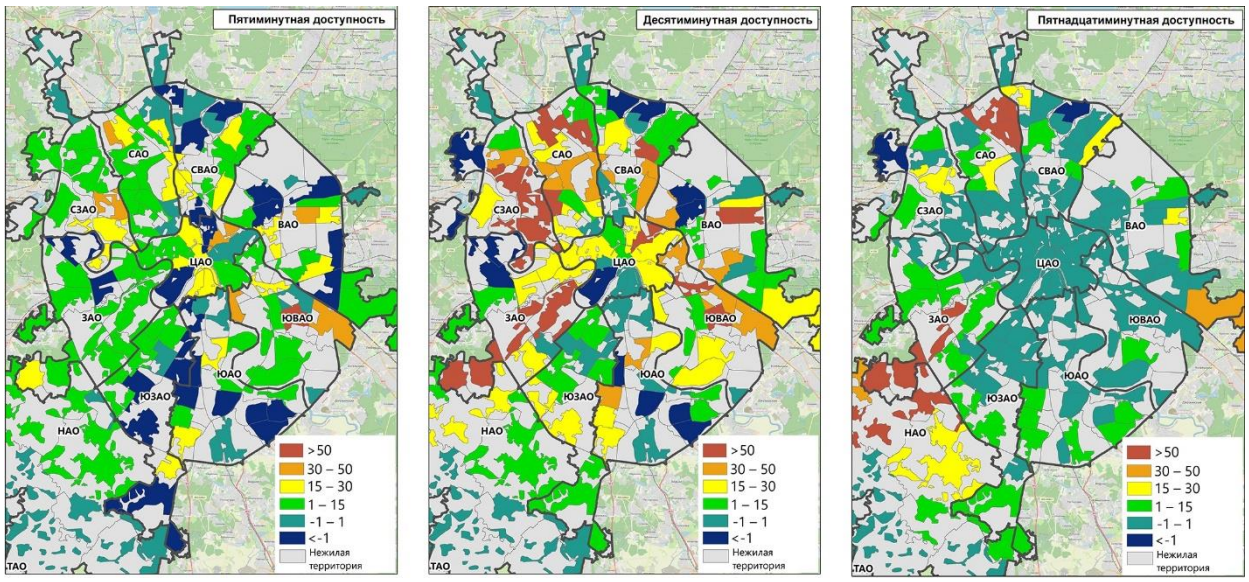


Рисунок 2 – Транспортная доступность станций метро, 5 минут, 2014–2022 гг. (слева). Транспортная доступность станций метро, 10 минут, 2014–2022 гг. (по центру). Транспортная доступность станций метро, 15 минут, 2014–2022 гг. (справа)

Транспортная доступность для коротких поездок (до 1,5 км; десятиминутная транспортная доступность) увеличилась почти везде, кроме районов, в которых активно проводились реформы, связанные с «Магистралью». В ЦАО, ЮЗАО и ЮАО во многих районах доступность станций метро уменьшалась, даже несмотря на введение новых станций метро, снижающих расстояние, которое нужно преодолеть до ближайшей станции.

В зоне 15-минутной транспортной доступности изменений мало, так как среднее расстояние поездки между станциями на наземном транспорте оказалось меньше, чем то, которое транспорт преодолевает за 15 минут (рисунок 2). В данном случае изменения связаны с открытием новых станций и почти не зависит от реформ наземного транспорта. Лишь в двух районах произошло снижение транспортной доступности станций, что скорее всего свя-

зано с изменением маршрутной сети наземного транспорта.

Пешеходная доступность станций метро

По полученным данным была составлена серия карт пешеходной доступности станций метро. Наибольшая пешеходная доступность характерна для районов ЦАО за весь период изучения (рисунок 3), в котором расположено более 40 станций на 66 км^2. В остальных округах, где на один район приходится от 1 до 3 станций метро в среднем доступность составляет от 15 до 30 % и зависит от размера жилой застройки в районе. Причем эти изменения часто зависят от структуры застройки. С приходом метро в Новомосковский АО доля жителей, имеющих метро в шаговой доступности изменилась незначительно. В поселении Сосенское, в котором было открыто 4 станции Сокольнической линии метров пределах 10 минутной доступности имеют лишь 10% жителей, тогда как в Ново-Переделкино, в котором было открыто две станции, доля людей имеющих метро составляет около 28 %. Районы с наибольшим охватом метро концентрируются к центру города в пределах Московского центрального кольца. Другим случаем высокого уровня доступности являются районы, в которых проходит две линии метро, таковыми являются Дорогомиловский район, а также Фили-Давыдково, где на небольшом расстоянии проходит Арбатско-Покровская и Филевская линии метро или районы юго-востока города, где на близком расстоянии проходят Таганско-Краснопресненская и Некрасовская линии, примером такого района являются Кузьминки (рисунок 3).

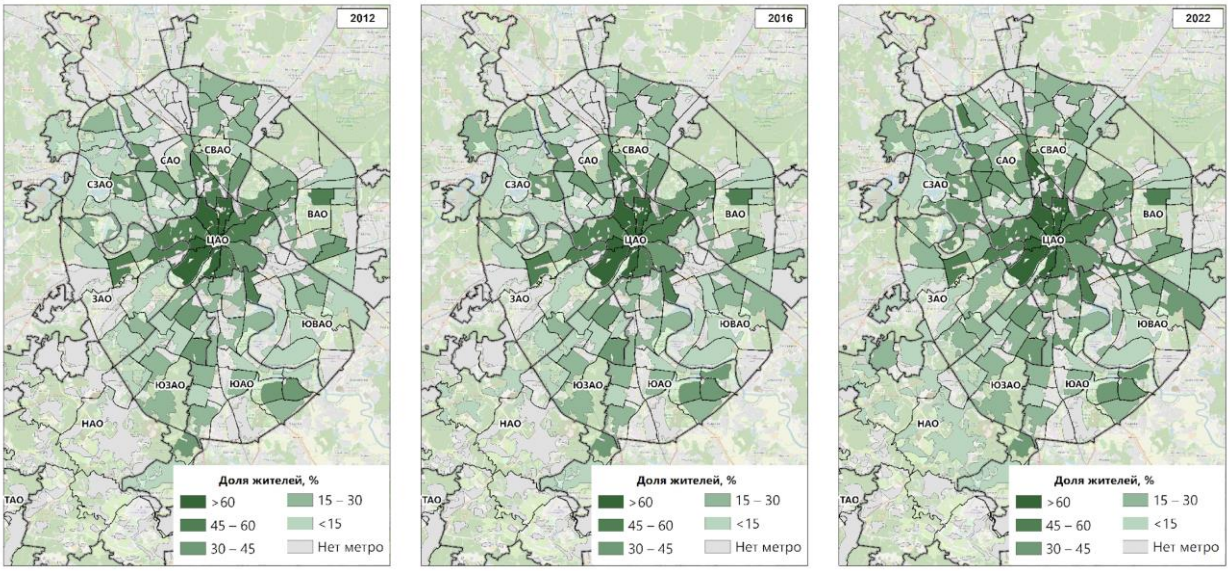


Рисунок 3. Пешеходная доступность станций метро в 2012 году (слева). Пешеходная доступность станций метро в 2016 году (в центре). Пешеходная доступность станций метро в 2022 году (справа)

В целом, можно сказать, что доля людей, проживающих в шаговой доступности метро изменяется мало, и в основном оно связно с открытием новых линий в районах, где метро никогда не было. Открытие Большой кольцевой линии почти никак не изменило доступность станций, в районах с пересадками. Изменение доли жителей в наибольшей степени сказалось на направлениях строительства радиальных линий метро (рисунок 4). Строительство новых выходов у пересадочных станций дает средний прирост лишь около 5 %, строительство новых станций дает средний прирост более 10 %, однако выделить закономерно-

сти очень сложно, так как данный показатель зависит в большей мере от конфигурации плотности населения, а не от административных границ района.

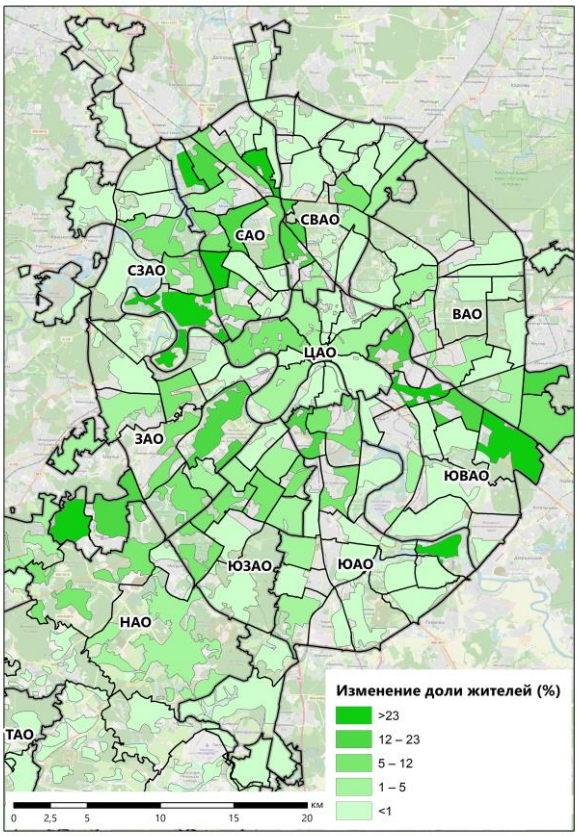


Рисунок 4 – Изменение доли жителей районов Москвы, имеющих метро в шаговой доступности в пределах жилой застройки с 2012 по 2022 год

В пределах десятиминутной доступности пешком проживает достаточно небольшая часть жителей (на 2022 г. около 23,5 %), причем рост этой доли (рисунок 5) незначительный в масштабах всего города. За исследуемый период прирост составил порядка 650 тыс. человек, что является лишь 5 % жителей города.

Изменение числа жителей происходит скачкообразно, что связано с резким ускорением ввода станций после 2016 года. Особенно значительный скачок связан с открытием Московского центрального кольца, которое является внутригородской электричкой, причем многие его станции расположены в районах, в которых внеуличного транспорта ранее не было, как например, в Коптево.

Обсуждение и выводы

По результатам исследования можно сделать выводы об изменении транспортной доступности районов города, однако не были охвачены важные метрики транспортной сети, такие как емкость сети, что может быть довольно важным, учитывая то, что в Москве существую автобусные маршруты с интервалом движения раз в час. Также стоит отметить, что единицы административно-территориального деления не являются репрезентативными единицами картографирования, так как транспортная доступность в большей мере опирается на плотность населения и плотность застройки, которые могут разительно отличаться внутри районов.

Проведенное исследование отличается от других исследований транспортных сетей большей концентрированностью на распределении населения внутри города, чем, например, исследования, проведенные С. А. Тарховым [Тархов, 2005] или М. Бартелеми [Barthelemy, 2018]. Они обладают большей полнотой с точки зрения топологии сети и ее топоморфометрических характеристик, но не отвечают на вопрос о том, насколько быстро пассажиры могут перемещаться по транспортной сети.

По своей структуре исследование похоже на работу Тайебе Сагапура [Saghapour et al., 2016], но с акцентом, смещенным в сторону исследования транспортной доступности, а не пропускной способности сети.

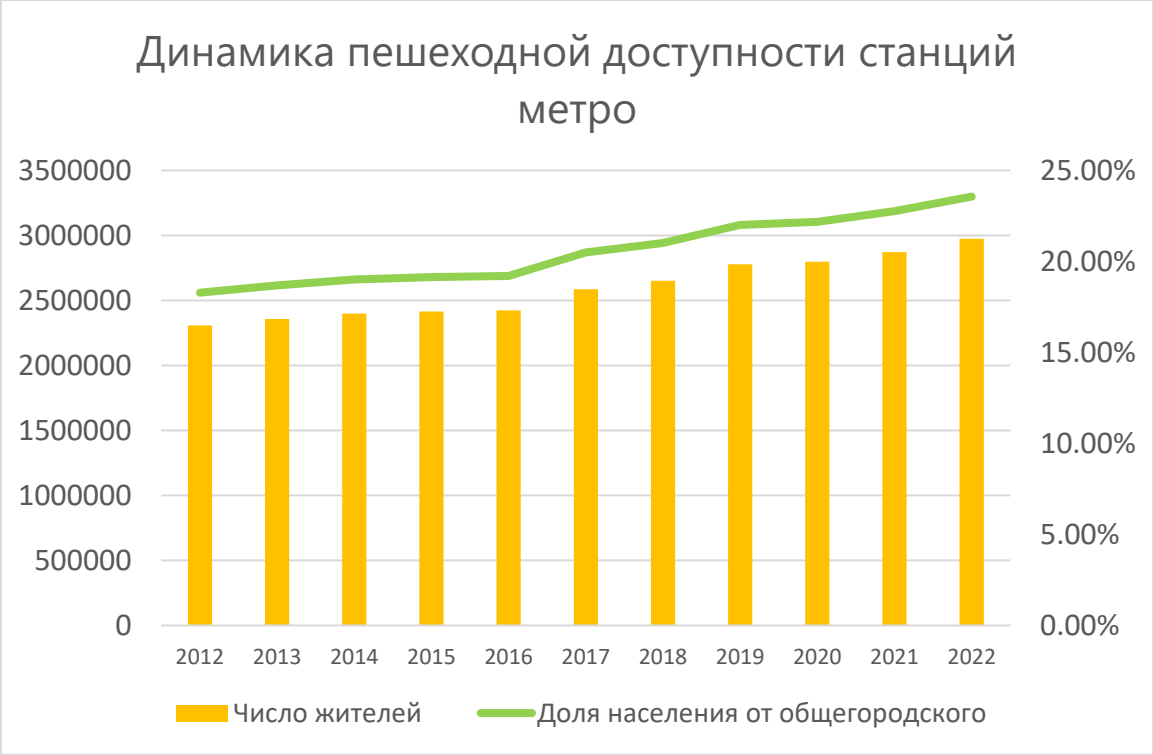


Рисунок 5 – Динамика пешеходной доступности станций метро

Таким образом, в работе была дана краткая оценка изменениям доступности транспортной сети Москвы за последние годы. Проведен геоинформационный анализ сети общественного транспорта Москвы, а также оценка полученных данных с точки зрения географической достоверности. Анализируя показатели, можно сказать, что основные изменения в транспортной доступности почти всегда связаны со строительством станций метро, влияние реформ наземного транспорта очень ограничено. Реформа сети «Магистраль» привела к росту доступности центра для менее чем 1 % населения, но результатом стало снижение связности районов и доступности станций метро для более чем 10 % населения.

Охват жителей системой метрополитена значителен, если рассматривать его доступность при использовании общественного транспорта, большая часть города имеет доступность метро в пределах 15-минутной доступности на наземном транспорте. Тем не менее, если рассматривать пешеходную доступность, то охват жителей незначителен (23,5 % на 2022 год) и изменения по сравнению с 2012 годом небольшие (прирост доступности для 5 % жителей города). Метрополитен является основой транспортных перевозок в городе, именно его вклад в транспортную доступность является решающим, наземный общественный транспорт способен изменить его в крайне незначительной степени.

Еще одним выводом к работе является плохая проработка данных Департаментом транспорта, ответственным за их публикацию на Портале открытых данных Правительства Москвы, данные о сети обновляются часто, но при этом имеют значительное число погрешностей.

Список литературы

Тархов С. А. Эволюционная морфология транспортных сетей. – Смоленск – Москва.: Универсум, 2005. – 384 с.

Barthelemy M. Morphogenesis of Spatial Networks. – Springer. Institut de Physique

Théorique. Guf-sur-Yvette, 2018. – 342 p.

Saghapour T., Moridpour S., Thompson R. G. Public transport accessibility in metropolitan areas: A new approach incorporating population density // Journal of Transport Geography. – 2016. – Vol. 54. – pp. 273–285.

Две трети москвичей предпочитают городской транспорт. [Электронный ресурс] URL: https://www.mos.ru/mayor/themes/2299/8443050 (дата обращения: 16.10.2022).

Подсчет пассажиропотока. Евромобайл. [Электронный ресурс] URL: https://www.euro-mobile.ru/solutions/transport/podschyot-passazhiropotoka/ (дата обращения: 11.10.2022).

Портал открытых данных Правительства Москвы [Электронный ресурс] URL: https://data.mos.ru/opendata/7704786030-ostanovki-nazemnogo-gorodskogo-passajirskogo-transporta/passport?versionNumber=7&releaseNumber=335 (дата обращения: 03.09.2022).

Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям. Росстат. [Электронный ресурс] URL: https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282 (дата обращения: 05.10.2022).

Яндекс: средняя скорость общественного транспорта Москвы выросла за год на 2%. [Электронный ресурс] URL: https://tass.ru/moskva/5929571?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (дата обращения: 07.04.2022).

Яндекс Карты. [Электронный ресурс] URL: https://yandex.ru/maps/ (дата обращения: 01.10.2022).

OpenStreetMap. [Электронный ресурс] URL: https://www.openstreetmap.org/ (дата обращения: 11.10.2022).

GitHub. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/ERomakh/Transport-accessability-research (дата обращения: 11.10.2022).

Сведения об авторах

Евгений Андреевич Ромах – студент 1 курса магистратуры кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Андрей Михайлович Карпачевский – старший научный сотрудник кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук

Геоинформационное моделирование речной сети на основе векторных данных с неопределенным направлением линий водотоков

Сохранных В.А., Самсонов Т.Е.

В данной работе описывается создание и реализация программными средствами универсального метода установления корректных направлений векторных водотоков и алгоритма присваивания водотокам порядков, согласно принятым в структурной гидрологии классификациям. Сеть моделируется как направленный граф, где места слияния рек представлены в виде вершин, а водотоки - в виде ребер графа. В качестве примера использования корректной топологической сети водотоков создается программный инструмент, способный устанавливать порядки водотоков согласно общепринятым гидрологическим классификациям: Стралера-Философова, Шриве, Хортона, Шайдеггера, Ржаницина, принятой в СССР для составления каталогов рек. Установление порядка водотока в программной среде невозможно без установления его направления от истока к устью и определения его иерархического места в гидрологической сети. Оба инструмента реализованы на Python при помощи открытых программных библиотек в среде QGIS.

Ключевые слова: гидрологический анализ, пространственный анализ, графы, NetworkX, гидрографическая сеть, определение порядков водотоков, рекурсивный алгоритм

GIS modeling of a river network based on vector data with an indeterminate stream direction

V.A. Sokhrannykh, T. E. Samsonov

This paper describes the creation and implementation by software of a universal method for establishing the correct directions of vector streams and an algorithm for assigning orders to streams, according to the classifications accepted in structural hydrology. The network is modeled as a directed graph, where the confluences of rivers are represented as nodes of the network, and streams are represented as edges. As an example of using the correct topological network of watercourses, a software tool is being created that is able to establish the orders of watercourses according to generally accepted hydrological classifications: Strahler-Filosofov, Shriv, Horton, Scheidegger, Rzhanitsin, adopted in the USSR for compiling river catalogs. Establishing the order of a watercourse in the software environment is impossible without establishing its direction from source to mouth and determining its hierarchical place in the hydrological network. Both tools are implemented in Python using open source libraries in the QGIS environment.

Keywords: hydrologic analysis, spatial analysis, graphs, NetworkX, hydrographic network, stream ordering, recursive algorithm

Введение

В цифровом моделировании рельефа есть разные пути для привлечения гидрографической информации. Сеть водотоков обычно извлекается из цифровой модели рельефа (ЦМР). Это тальвеги, которые не являются постоянными или даже временными водотоками, а гидрологические расчеты требуют реальной информации о водотоках. Поэтому в ряде задач целесообразно использовать векторные водотоки из баз пространственных данных.

В геоинформатике используются разные модели пространственных данных. Речные сети чаще представляют в виде сетевой модели, поэтому под моделированием в статье понимается построение топологически корректной сетевой модели, с помощью которой можно решать различные задачи, в том числе присвоение водотокам порядков. К сожалению, большинство баз пространственных данных, включающих данные гидрографии, не имеют корректной топологии.

Создание корректно направленной пространственно-топологической модели гидрологической сети необходимо для алгоритмов установления порядка водотоков [Gleyzer и др., 2004], моделирования гидрологического стока [Алексеевский и др., 2004], улучшения качества цифровых моделей рельефа (ЦМР) [Monteiro и др., 2018], решения задач генерализации в картографировании [Samsonov, 2020], создания корректных границ водосборов [Castronova и др., 2014], в качестве инструмента поддержки принятия решений [Ogie и др., 2017], и прогнозирования наводнений [Schwenk и др., 2020]. Изучение литературы показало, что при создании гидрологических моделей в большинстве случаев направление водотоков устанавливается вручную, что говорит об актуальности появления такого инструмента, который бы автоматически устанавливал корректное направление тока.

Помимо автоматического установления направления водотоков, создан программный инструмент, решающий вопрос установления порядков водотоков, принятых в структурной гидрологии. Инструмент создан с целью показать применимость корректно направленных векторных водотоков в геоинформационном моделировании. Реализованы алгоритмы установления порядков по классификациям Стралера-Философа, Шриве, Хортона, Шайдеггера, Ржаницина, принятой в СССР для составления каталогов рек. Подробнее о классификациях можно узнать из статьи [Алексеевский и др., 2004].

Материалы и методы

Методика установления направлений векторных водотоков

Гидрографическая сеть является одним из примеров *пространственных сетей*, а именно, *географической сетью*. *Пространственные сети* – сети, ребра и вершины которых соответствуют реальным физическим объектам, при этом с формированием ребра, как правило, ассоциирована какая-либо стоимость [Barthelemy, 2018]. *Географические сети* – вид пространственных сетей, имеющих строгую географическую (геодезическую) локализацию всех входящих в нее элементов в заданном масштабе исследования.

Гидрографическая сеть может относиться как к *ветвящимся*, так и к *циклическим* (в случае бифуркации) *линейным сетям*. В виде ребер можно представить участки водотоков, в виде вершин – места их слияния. Именно так будет интерпретировать векторный файл функция, импортирующая его в граф.

Предложенная методика рассматривает один водосборный бассейн, как иерархическое дерево, в котором необходимо определить «листья» – водотоки первого порядка (истоки), и корень(-ни) – устье (дельту). Речные сети некорректно представлять в виде деревьев из-за случаев бифуркации и разветвления, однако терминология в дальнейшем будет использоваться для удобства представления. В этом случае нет необходимости искать высоты для каждого сегмента. Нужно будет знать лишь значения высот в тех вершинах графа, инцидентность которых равна 1.

Алгоритм сборки графа имеет следующую последовательность:

1) Исходные линии разбиваются на составные части так, чтобы конечные точки одних линий «разрезали» другие.
2) Векторный файл водотоков считывается как таблица. Каждой линии присваивается уникальный идентификатор.
3) В отдельный слой извлекаются *начальные* и *конечные* точки линий. Начальным присваивается индекс 0, конечным – 1.
4) Каждой точке присваивается уникальный идентификатор.
5) Для каждого *уникального положения* точек присваивается единый уникальный идентификатор (при слиянии двух рек в одну в месте слияния находятся одновременно три точки. Все они получают одинаковый идентификатор *положения*).
6) Создается неориентированный граф, который не содержит в себе геометрию объектов. Для ребер графа переносятся атрибуты уникального идентификатора линий и идентификатора *положения* (см. П5) *конечной* точки (см. П3). Для вершин – идентификатор *положения* (рисунок 1).

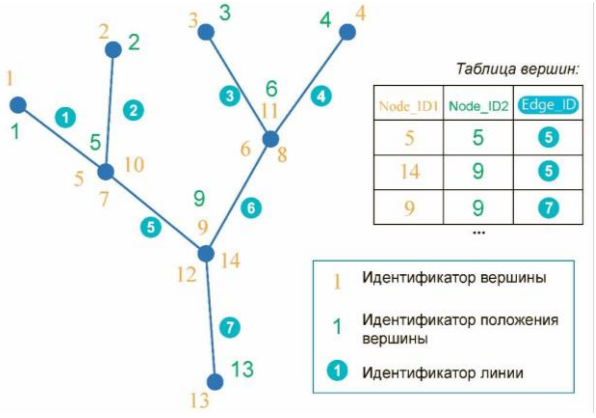


Рисунок 1 – Схема создания графа с присвоением идентификаторов его элементам

7) Далее каждый компонент рассматривается в цикле как подграф:
   a) В список извлекаются идентификаторы вершин, чья инцидентность = 1.
   b) Для них извлекаются значения высоты, после чего высоты сравниваются. Вершина с наименьшей высотой – устье. Она извлекается из списка (см. 7.a) и присваивается отдельной переменной. Список (см. 7.a) становится списком листьев дерева, вершина с наименьшей высотой является корнем этого дерева.
   c) Среди списка листьев производится поиск, нет ли среди них таких, которые являются частью дельты (то есть устьем). Для этого сравниваются высоты вершин-листьев с высотой вершины-корня дерева. Если высота листа попадает в диапазон, задаваемый пользователем (в зависимости от разрешения ЦМР – 0, 1, 2 метра, не больше), то такая вершина удаляется из списка листьев и добавляется в список устьев (корней).
   d) Из каждой вершины из списка листьев дерева строятся ВСЕ возможные простые (вершины не повторяются) пути до корня дерева. Именно построение всех возможных простых путей позволяет учесть случаи бифуркации вдоль течения, а также в дельтах и при разветвленном русле. Каждый маршрут извлекается как *список* вершин в порядке следования от листа к корню. Вершины идентифицируются уникальным номером *геометрии*.
   e) Из данного маршрута мы можем извлекать ребра по их вершинам. У каждого ребра есть идентификатор его конечной точки (см. П6). Проходя по ребрам от начальной до конечной точки, поэлементно сравнивается список идентификатора конечной точки каждого ребра и *список* (см. 7.d) вершин по их порядку. Если направление всех линий

изначально было правильным, то эти два списка будут идентичны. Если же часть линий были направлены неверно, списки будут не совпадать. Несовпадающие элементы списка будут указывать на те линии, чье направление необходимо развернуть. Идентификаторы (Feature ID) этих линий извлекаются в отдельный список. Схема работы представлена на рисунке 2.

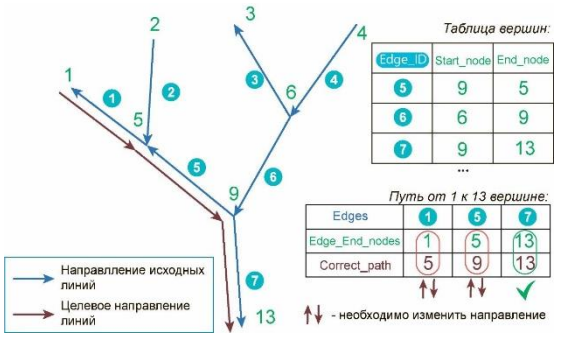


Рисунок 2 – Схема получения ID водотоков, направление которых необходимо изменить

8) В исходном слое линий выбираются все линии, чей идентификатор есть в списке, и их направление меняется на противоположное
9) Водотоки, которые не имеют между собой притоков или оттоков (в случае бифуркации) «сшиваются» между собой с целью уменьшить количество объектов для дальнейшей обработки. Для сшивания используется выделение ребер графа, инцидентных вершинам, степень которых равна 2.

Программные средства

Все алгоритмы в статье реализованы в QGIS в виде Processing Plugin. Плагин содержит два инструмента: установление направлений водотоков и определение порядков водотоков.

В работе используются библиотеки Python для следующих целей:

- Shapely, OGR и GDAL– для работы с геометрией объектов;
- NetworkX – для работы с графами (в том числе для получения всех простых путей (*all_simple_path*), кратчайших путей (*shortest_path*), обнаружение циклов (*cycles*) и т.д.);
- Pandas – работа с таблицами;
- OS – работа с операционной системой;
- NumPy – создание массива из растра, его чтение;
- QGIS.Processing – для работы с инструментами QGIS (выделение линий по ID (*qgis:extractbyexpression*), разворот линий (*native: reverselinedirection*), разбивка линий о линии (*native:splitwithlines*) и т.д.).

Также используется импорт отдельных готовых скриптов, скаченных из открытого доступа. Для их импорта файлы кода помещаются внутрь папки плагина. Код доступен для загрузки по электронному адресу: https://github.com/VitaliySokhrannykh.

Объект картографирования и источники данных

Реализация полученного алгоритма была опробована на данных различной детализации. Так, были выбраны наборы данных, которые используются при картографировании в следующих масштабах:

Мелкий – Данные Natural Earth, масштаб *1:10 000 000* для всего мира [Natural Earth 1:10m Physical Vectors, 2022]. Особенностью данной базы пространственных данных является малое количество притоков рек.

Средний – Данные DIVA GIS. Масштабный ряд *1:500 000 – 1:1 000 000* [Free Spatial Data | DIVA-GIS, дата обращения 25.04.2022]. Отличается большей детальностью. В отличие от предыдущей базы данных, гидрографическая сеть сложнее. Имеет в некоторых местах оросительные и городские каналы, множество случаев бифуркации, разветвленные устья. Достаточно много изолированных рек внутри континента, которые не связаны ни с одной

речной сетью и находятся удаленно. Такие фрагменты относятся к бассейну внутреннего стока и зачастую появляются из-за того, что данные реки впадают в озеро, которое не отображено в слое с реками.

Крупный – Данные государственной базы Индонезии, остров Бали. Масштабный ряд – *1:10 000 – 1:50 000* [Ketut и др., 2019]. Имеют некоторые особенности: наиболее крупные реки острова отображены не одной линией, а двумя – так, как будто подразумевается полигон, однако слой линейный. Для относительно небольшой площади имеет более 10 000 линий водотоков. Можно наблюдать разветвление сети. В ходе тестирования работы инструмента была выявлена ошибочная топология для некоторых рек: конечные вершины векторов находятся не на линии другого водотока, а рядом с ним, из-за чего в ходе работы инструмента может появиться приток, которого на самом деле нет, либо же нарушится вычисление порядков. Такие проблемы достаточно часто встречаются в различных базах пространственных данных.

Прежде чем работать с данными, необходимо устранить топологические ошибки с помощью специальных инструментов устранения проверки топологии в любой удобной ГИС.

Для демонстрации работы инструментов были взяты фрагменты баз пространственных данных. Для мелкого масштаба из данных Natural Earth взяты реки для *Северной и Южной Америки*. Из DIVA GIS взят фрагмент для *острова Хоккайдо, Япония*. Для крупномасштабных данных взят фрагмент *южной части острова Бали*.

Для получения высот использовались следующие данные: для мелкого масштаба алгоритм с использованием Open Elevation Data (SRTM с разрешением 250 м); для среднего (остров Хоккайдо) – SRTM с разрешением 90 метров, для крупного (остров Бали) – SRTM с разрешением 30 метров.

Результаты

Мелкий масштаб (Natural Earth 1:10m)

Для данного векторного слоя были изменены направления для 439 из 1052 векторных водотоков (42%). Стоит отметить, что большинство линий, чье направление необходимо было изменить, были выбраны верно. Ошибки возникли в тех местах, где линии имели разрыв друг относительно друга (конечные точки соседних линий имели различные координаты). При устранении ошибок топологии удалось бы избежать появления ошибок. Результат определения неправильного направления водотоков можно рассмотреть на рисунке 3.

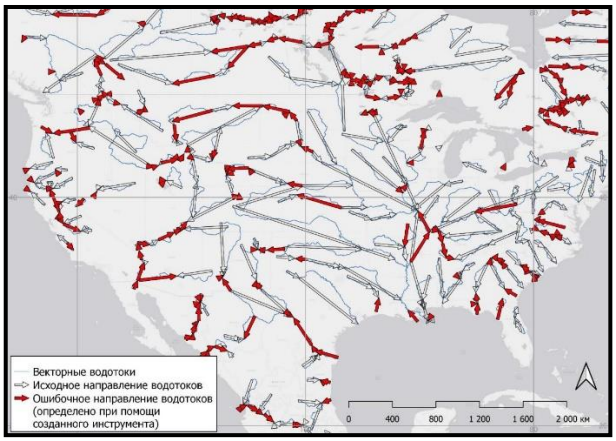


Рисунок 3 – Результат определения ошибочных направлений водотоков для данных Natural Earth 1:10 m, южная часть Северной Америки

Средний масштаб (DIVA GIS, Масштабный ряд 1:500 000 – 1:1 000 000)

Для следующего набора данных были изменены направления для 277 из 423 векторных водотоков (65 %). В отличие от Natural Earth, топологические ошибки в данном наборе данных не встречаются. Количество рек после разбивки линий не изменилось.

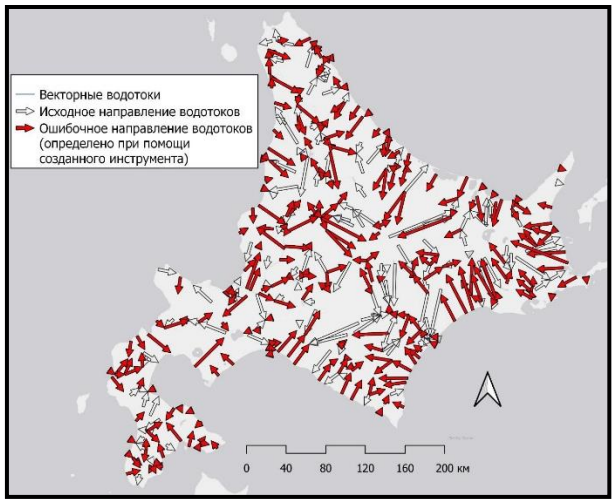


Рисунок 4 – Результат определения ошибочных направлений водотоков для данных DIVA GIS, остров Хоккайдо, Япония

Можно отметить, что данный набор имеет малое количество ошибок (рисунок 4). При визуальном обзоре было обнаружено лишь три водотока, выбранных ошибочно, по причине того, что и исток, и устье находятся вдоль береговой линии. Все три вектора находятся внутри одного бассейна.

Крупный масштаб (Данные государственной базы Индонезии, остров Бали. Масштабный диапазон 1:10 000 – 1:50 000)

Алгоритм выбрал 36 водотоков, для которых необходимо изменить направление. Всего в тестовый набор входило 1598 водотоков. Итого процент выбранных данных составляет чуть более 2%. Для этого набора данных наблюдается та же ошибка, что и для данных Natural Earth – наблюдается перехлест линий в местах стыков, из-за чего при разбиении линий образуются новые крошечные «притоки», направление которых ошибочно (короткие стрелки на рисунке 5). Из 36 водотоков с неправильным направлением 11 относятся именно к таким ошибкам. Основное количество водотоков с неправильным направлением сосредоточено ближе к устьям рек.

Также часть выделенных водотоков относятся к местам разветвления сети, где достаточно сложно сказать, какое направление является верным, так как водотоки расположены перпендикулярно основному направлению русла. Среди выделенных водотоков уверенно можно сказать, что алгоритм выделил ошибочно только пять водотоков. Это вектора, соединяющие разветвленные гидрографические сети. Такое происходит в том случае, если высоты конечных точек дельт не попали в диапазон высот, задаваемый пользователем в параметрах инструмента.

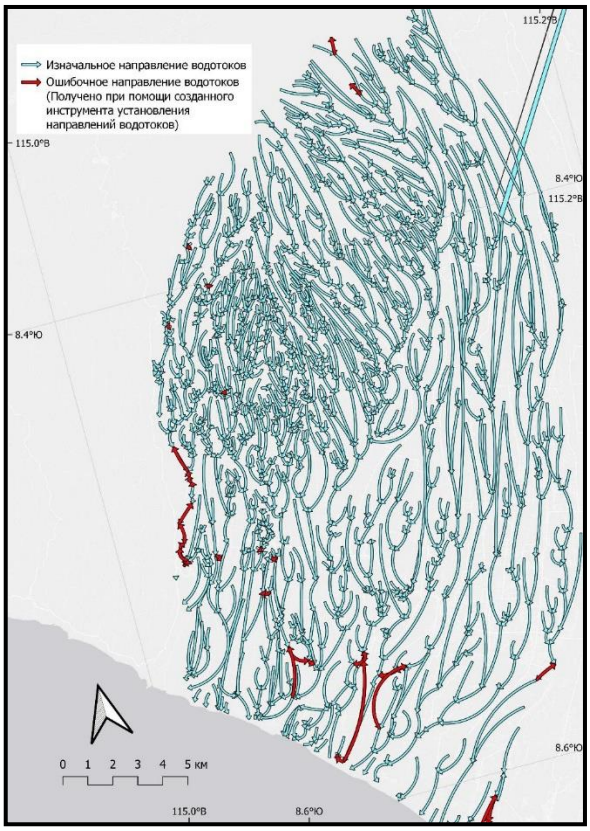


Рисунок 5 – Результат определения ошибочных направлений водотоков для данных государственной базы данных Индонезии, остров Бали

Далее на рисунках 6, 7 представлены результаты вычисленных порядков водотоков для каждой из шести классификаций соответственно: принятый в СССР для составления каталогов рек, Хортона (Рисунок 6), Ржаницина, Стралера-Философова, Шриве и Шайдеггера (Рисунок 7).

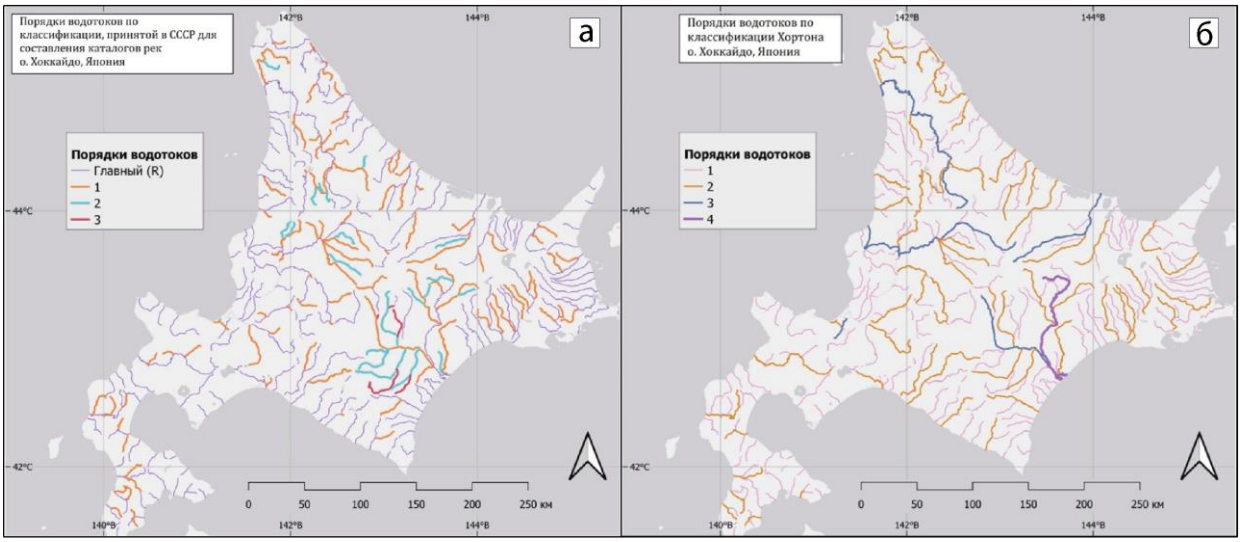


Рисунок 6 – Порядки водотоков в классификации, принятой в СССР для составления каталогов рек (а), Хортона (б)

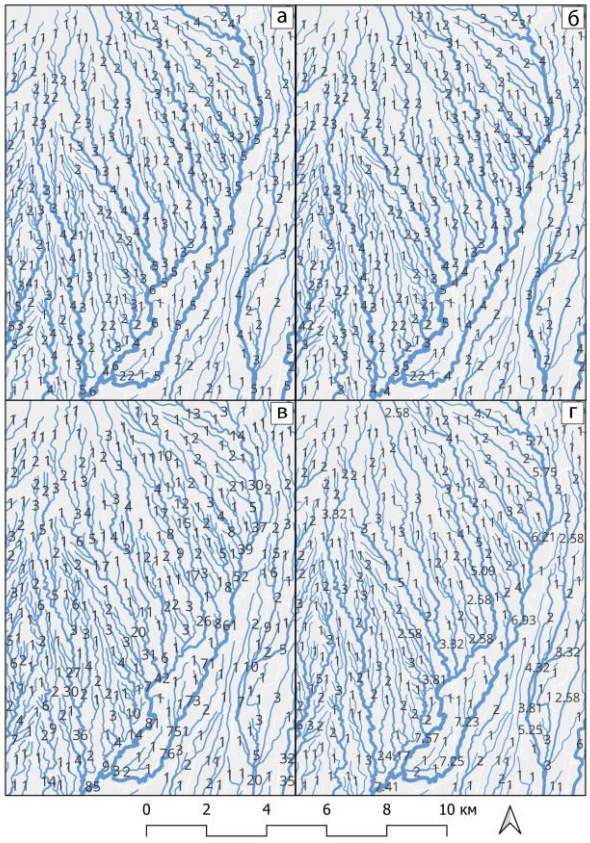


Рисунок 7 – Порядки водотоков в классификации Ржаницина (а), Стралера-Философова (б), Шриве (в), Шайдеггера (г)

Выводы

Установление направлений водотоков

Эксперимент проводился над «сырыми» данными, без предварительной обработки топологии, с целью установить несовершенства векторных данных и понимания природы получившихся ошибок. Для каждого набора тестовых данных посчитаны индексы: индекс точности направления течения для набора данных – *D*, индекс качества произведенного установления направлений водотоков – *E*:

$$D = \frac{n}{N}, E = \frac{m-n}{m},$$

где n – количество рек, которые необходимо перевернуть, m – количество рек, направление которых было изменено инструментом, N – количество всех рек в тестовом наборе данных. На основании полученных результатов была составлена таблица 1, включающая в себя предложенные индексы.

Ясно, что на крупномасштабных данных подробность выше, а значит отображено больше антропогенных водотоков, бифуркации, разветвления русла, что создает сложность для модели определить правильное направление водотока. Что касается сравнения наборов данных водотоков, наибольшее количество топологических ошибок имеет Natural Earth.

Стоит учитывать, что данные для получения значений высот должны быть сопо-

ставимы по разрешению с данными векторных водотоков. Не должно быть такого, что для крупномасштабных данных водотоков будет использоваться ЦМР с разрешением, меньшим, чем графическая точность данного масштаба (0,02×M). Также и для мелких масштабов не стоит использовать ЦМР с высоким разрешением. По итогу это может привести к извлечению ошибочной высоты, из-за чего при сравнении высот истока и устья произойдет некорректное определение направления водотока.

Таблица 1 – Оценка полученных в ходе работа инструмента установления направления водотоков результатов

Тестовый набор данных	Количество объектов	Выбрано векторов с неправильным направлением	Визуально выделено векторов с ошибочным направлением	D, %	E,%	Замечено топологических ошибок
Natural Earth 1:10m	*1052*	*439*	*425*	*42*	*3,1*	*43*
DIVA GIS	*423*	*277*	*274*	*65*	*1,1*	*0*
Данные государственной базы Индонезии	*1598*	*36*	*31*	*2*	*13,9*	*11*

Стоит отметить, что самым длительным в процессе обработки данных является этап обработки табличного поэлементного сравнения геометрии конечных точек линий в векторном слое. Инструмент подлежит доработке с целью улучшения оперативности. Остальные части кода работают оперативно даже для большого объема данных.

Присвоение порядков водотоков

Точность определения порядков водотоков напрямую зависит от данных, которые поданы на вход инструменту. Для того, чтобы результат был полностью правильным необходимо:

- Подать векторный слой с корректной топологией (без разрывов, нахлеста и т. д.);
- Подать векторный слой с корректным направлением водотоков.

Эти два условия необходимы и достаточны для 100% правильного результата. В случае, если в векторном слое будут ошибки, инструмент все равно выполнит задачу, однако порядки будут отображены корректно не везде.

Стоит отметить, что программная реализация определения порядков водотоков работает быстро. Для вычисления порядков одновременно по всем шести классификациям для векторного слоя из примерно 2000 объектов требуется 0,5 сек.

Заключение

Реализованная методика является эффективной для данных различного масштаба. Практика показала, что смена направлений водотоков происходит для абсолютного большинства водотоков, для которых это требуется. Ошибки преимущественно в тех местах, где наблюдается нарушение топологии объектов в исходных векторных данных. Ошибки также могут возникать при несоответствии масштабного ряда векторных данных и данных о высоте; при наличии малых (в пределах масштаба) изолированных водотоков, чьи начальные и конечные точки могут оказаться на равных или несоответствующих действительности высотах. В крупном масштабе будет возникать большее количество ошибок, что связано с увеличение числа «обрывков» водотоков. Обилие таких «обрывков» можно наблюдать среди крупномасштабных данных OSM. Также ошибки часто возникают при разветвляющемся

к устью русле (в том числе в сложных дельтах).

Корректная топология векторной гидрографической сети, данные о высоте без «шумов» и соответствующего масштабного ряда приведут к максимально точному результату. При использовании уже скаченной ЦМР и подаче на вход ограниченного числа водотоков (до 1000, можно разделить исходный набор данных на части), вам удастся быстро получить результат. Код доступен для загрузки по электронному адресу: https://github.com/VitaliySokhrannykh.

Список литературы

Алексеевский Н. И., Айбулатов Д. Н., Косицкий А. Г. Масштабные эффекты изменения стока в русловой сети территории // География, общество, окружающая среда. – 2004. Т. 6. – с. 345–374.

Ржаницин Н. А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети // Л.: Гидрометеоиздат. 1960. – Т. 238. – с. 11.

Barthelemy M. Morphogenesis of spatial networks // Springer, 2018.

Castronova A. M., Goodall J. L. A hierarchical network-based algorithm for multi-scale watershed delineation // Computers & Geosciences. – 2014. – Vol. 72. – pp. 156–166.

Gleyzer A. A fast recursive gis algorithm for computing Strahler stream order in braided and nonbraided networks // J Am Water Resources Assoc. – 2004. – Vol. 40. – No 4. – pp. 937–946.

Horton R. E. Drainage-basin characteristics // Transactions, American Geophysical Union. – 1932. – Vol. 13. – pp. 350–361.

Ketut S. System For Automated Mapping Of Water Quality According State Environmental Data // 2019.

Krajina T. SRTM.py [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/tkrajina/srtm.py (дата обращения: 20.04.2022).

Leyh W. A Conceptual Building-Block and Practical OpenStreetMap-Interface for Sharing References to Hydrologic Features // Advances in Human Factors, Sustainable Urban Planning and Infrastructure. – 2018. – pp. 137–148.

Monteiro E., Fonte C., Lima J. Analysing the Potential of OpenStreetMap Data to Improve the Accuracy of SRTM 30 DEM on Derived Basin Delineation, Slope, and Drainage Networks // Hydrology. – 2018. – Vol. 5. – No 3. – p. 34.

Ogie R., Tomas H., Dunbar M., Turpin E. Spatio-topological network analysis of hydrological infrastructure as a decision support tool for flood mitigation in coastal mega-cities // Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. – 2017. – Vol. 44. – No 4. – pp. 718–739.

Samsonov T. E. Automated Conflation of Digital Elevation Model with Reference Hydrographic Lines // IJGI. – 2020. – Vol. 9. – No 5. – p. 334.

Scheidegger A. E. The algebra of stream-order numbers // United States Geological Survey Professional Paper. – 1965. – Vol. 525. – pp. 187–189.

Schwenk J., Piliouras A., Rowland J. C. Determining flow directions in river channel networks using planform morphology and topology // Earth Surface Dynamics. – 2020. – Vol. 8. – No 1. – pp. 87–102.

Shreve R. L. Statistical law of stream numbers // The Journal of Geology. – 1966. – Vol. 74. – No 1. – pp. 17–37.

Strahler A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology // Eos, Transactions American Geophysical Union. – 1957. – Vol. 38. – No 6. – pp. 913–920.

Natural Earth 1:10m Physical Vectors [Электронный ресурс]. URL: https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-physical-vectors/ (дата обращения: 25.04.2022).

Free Spatial Data | DIVA-GIS [Электронный ресурс]. URL: https://www.diva-gis.org/Data (дата обращения: 25.04.2022).

Open-Elevation API [Электронный ресурс]. URL: https://open-elevation.com/ (дата обращения: 20.04.2022).

Сведения об авторах

Виталий Александрович Сохранных – студент 1 курса магистратуры кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

Тимофей Евгеньевич Самсонов – ведущий научный сотрудник кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, кандидат географических наук.

Опыт использования высокодетальных данных дистанционного зондирования для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур

Хлюстова В.В., Балдина Е.А.

На нескольких примерах продемонстрированы возможности применения наземного бесконтактного спектрометрирования и многозональной беспилотной аэросъемки для нужд растениеводства. Описаны полевые эксперименты по детектированию заболеваний озимой пшеницы и определению засоренности сои и кукурузы. Развитие грибковых болезней пшеницы рассмотрено на всем периоде роста культуры от всходов до молочно-восковой спелости. Рассчитаны узкоспектральные вегетационные индексы, демонстрирующие связь между спектральными характеристиками растения и степенью поражения болезнью листовой пластины на ранних стадиях развития заболевания. Для пропашных культур проанализирована связь проективного покрытия, обусловленного сорной растительностью, с вегетационными индексами, получаемыми по многозональной аэросъемке. Выявлены индексы, эффективные для определения проективного покрытия сорной растительности на разных этапах вегетации кукурузы и сои.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, наземное спектрометрирование, вегетационные индексы, коэффициент спектральной яркости, засоренность посевов

The experience of highly detailed remote sensing data utilization for the assessment of crops conditions

Khliustova V.V., Baldina E.A.

Several examples demonstrate the potential of using ground-based non-contact spectrometry and multispectral unmanned aerial surveying for crop production. Field experiments for disease detection in winter wheat and for the detection of soybean and maize infestations are described. The development of fungal diseases of wheat is considered during the whole period of crop growth from seedlings to milk-wax ripeness. Narrow-spectral vegetation indices were calculated, demonstrating the relationship between the spectral characteristics of the plant and the degree of leaf-plate disease affection at early stages of disease development. For row crops, the relationship between projective cover due to weed vegetation and vegetation indices derived from multi-zone aerial surveys was analyzed. Indices effective for determining the projective cover of weeds at different stages of maize and soybean vegetation were identified.

Keywords: unmanned aerial vehicles, ground-based spectrometry, vegetation indices, reflectance coefficient, weed infestation

Введение

Сельскохозяйственная отрасль экономики является стратегически важной для многих стран. В России ведущая роль приходится на растениеводство, наибольшие посевные площади заняты зерновыми, а именно озимой и яровой пшеницей [Сельское…, 2019]. Привлечение результатов анализа космических снимков, данных съемок с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), обеспечивающих высокую периодичность получения материалов мониторинга, актуально на всех этапах получения продукции растениеводства от подготовки почвы к посеву до сбора урожая [Кремнева, 2021]. Кроме того, результаты контактного

и бесконтактного наземного спектрометрирования позволяют получить высоко детальную спектральную информацию о растительности.

Ранее были проведены исследования по выявлению эталонных спектральных образов сорной растительности зерновых и пропашных сельскохозяйственных культур Краснодарского края [Шумилов и др., 2018]. Установлено, что для количественной оценки степени засоренности необходима беспилотная съемка с крайне низкой высоты (около 1–2 метров над верхушками растений), что является трудоемким походом, нереализуемым на больших посевных площадях.

Согласно другим исследованиям, одномоментные спектральные характеристики для сорной растительности и культурных посевов могут отличаться статистически незначительно. Однако момент максимального различия между растительностью разных видов может приходиться на разное время, что связано с отличиями в ходе вегетации культур и сорных растений. Таким образом, более эффективным методом для задач определения различных видов растительного покрова является анализ многовременных синтезированных изображений в течение вегетационного периода [Плотников и др., 2018]. В то же время одномоментные снимки позволяют эффективно оценить густоту и сомкнутость посевов, индекс листовой поверхности, степень поврежденности неблагоприятными метеоусловиями, вредителями и болезнями, а также состояние почвы [Fieuzal et al., 2017].

Распространенным подходом к анализу данных ДЗЗ является применение производных индексных изображений. Для дешифрирования растительности используются вегетационные индексы – показатели, рассчитываемые на основе алгебраических комбинаций интенсивностей отраженного излучения или яркостей пикселей в различных спектральных диапазонах и характеризующие параметры растительности [Candiago et al., 2015]. Большинство индексов для оценки состояния растительности базируются на принципе поглощения хлорофиллом излучения в красной части спектра (630–700 нм) и отражения в зеленом (510–570 нм) и БИК (700–1100 нм) диапазонах [Mulla, 2013].

Использование значений интенсивности, полученных в широких спектральных каналах, зачастую является неэффективным при детектировании стрессовых состояний на ранних стадиях. Показано, что биофизические модели, построенные по гиперспектральным данным, на 25% эффективнее в прогнозировании урожайности [Mariotto et al., 2013]. В методике Деркачевой А.А. с соавторами [2015] описан подход к обработке гиперспектральных данных, полученных методом наземного спектрометрирования, с расчетом вегетационных индексов. Выявлены узкоспектральные вегетационные индексы, наилучшим образом характеризующие содержание пигментов антоцианов, каротиноидов, хлорофилла a и b, химического элемента азота, а также количество зеленой фитомассы.

В методике, описанной Тутубалиной О.В. с соавторами [2017], подтверждается высокая корреляция зеленой фитомассы укосов сельскохозяйственной растительности со значениями индекса NDVI, рассчитываемого по широким каналам многозональных съемочных систем. В то же время отмечено, что узкоспектральные аналоги NDVI дают результаты с высокой корреляцией с фактической фитомассой и для более сложных природных сообществ. Наиболее полно методика проведения полевой гиперспектральной съемки описана Даниловым Р.Ю. с соавторами [2020].

Таким образом, целью работы является

рассмотрение и оптимизация существующих методик определения состояния культурных растений, включая съемку с БПЛА и данные наземного бесконтактного спектрометрирования и выработка подхода к сравнению различных данных мониторинга посевов сельскохозяйственных культур.

Материалы и методы

Полевые исследования были проведены на двух ключевых участках на территории ФГБНУ ВНИИБРЗ в г. Краснодаре.

Участок 1. Наземное спектрометрирование и многозональная аэросъемка для изучения грибковых болезней озимой пшеницы

Изучаемый объект включает 15 делянок, засеянных озимой пшеницей семи сортов: по две на каждый сорт. Эксперимент посвящен определению спектральных характеристик здоровых и пораженных грибковыми инфекциями посевов озимой пшеницы. В эксперименте задействованы сорта озимой пшеницы разной степени устойчивости к грибковым заболеваниям, каждый из которых представлен контрольным и инфицированным участками (рисунок 1).

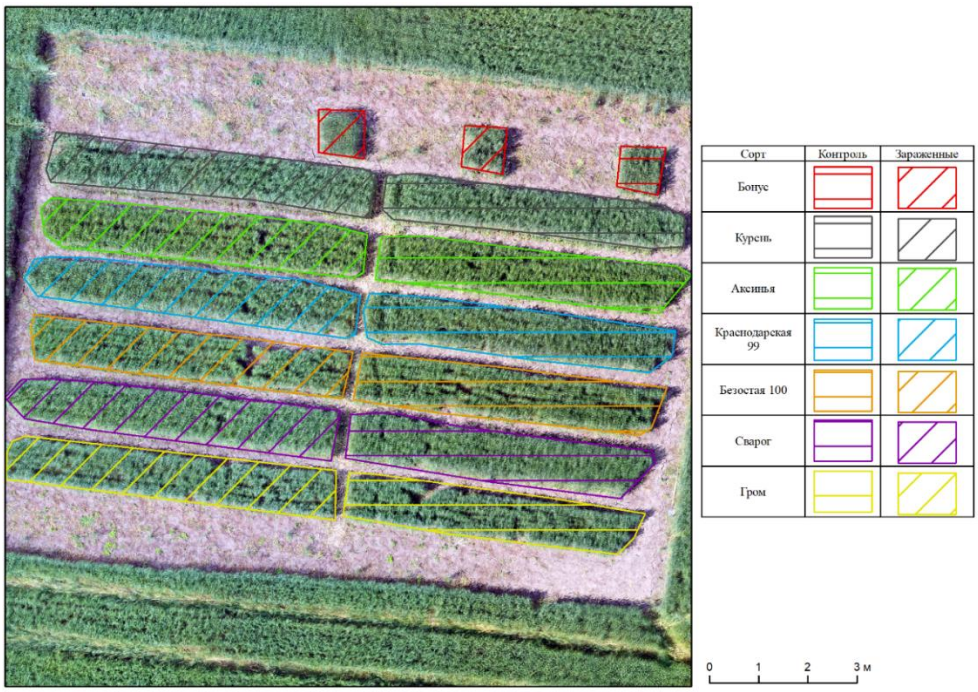


Рисунок 1 – Схема расположения опытных делянок озимой пшеницы на снимке 28 мая 2021 года

Мониторинг состояния посевов включал проведение гиперспектральных измерений каждые 2–5 дней с момента заражения до достижения культурой фазы молочно-восковой спелости. Используемые приборы:

1. Спектрометр SpectroSense-2, производитель SkyeInstruments, Великобритания) (спектрометр SpectroSense-2);
2. Спектрорадиометр ASD FieldSpec 3 Hi-Res (ASD), производитель Malvern Panalytical, Великобритания (Спектрорадиометр ASD FieldSpec 3 Hi-Res).

Спектрометрия проводилась по рекомендациям, описанным Кремневой О.Ю., Тутубалиной О.В. с соавторами [2020] в режиме фиксации интенсивности отраженного излучения. Вначале выполнялась калибровка переносного прибора ASD в текущих условиях освещенности по эталонной белой карте – панели с известной спектральной кривой в диапазоне длин волн работы спектрометров. Затем осуществлялось измерение эталонной панели. Далее проводились измерения исследуемых объектов

в 7–10 повторностях в пределах одной делянки. Каждая повторность представляет собой осредненное значение из пяти измерений, сделанных в точке.

В ходе полевого опыта проведено 10 серий гиперспектральных измерений в течение вегетационного периода озимой пшеницы. Каждая съемка состоит из 14 измерений: 7 опытных делянок различных сортов с инфицированными посевами (две делянки сорта бонус приняты за один объект) и 7 контрольных участков, что составляет 100–120 наборов данных.

Отдельно проводился визуальный учет степени поражения болезнями специалистом биологом-фитопатологом 5, 13, 27 мая и 8 июня 2021 года. Осмотр проводился по традиционной методике фитосанитарного мониторинга [Ченкин, 1993]. Данные собраны в статистически значимом объеме: 45 образцов для подсчета площади, пораженной заболеванием, для каждого изучаемого объекта.

При обработке исходных данных спектрометрии рассчитан коэффициент спектральной яркости (КСЯ) на основе измерений растительности в условных единицах и белой панели, дающей максимальное отражение. Результат выражен в процентах.

Все величины скорректированы с учетом изменений солнечной радиации, зафиксированных стационарным спектрометром. Для этого использованы данные стационарного спектрометра SpectroSense-2, фиксирующего верхним сенсором интенсивность солнечной радиации с интервалом 2–5 секунд.

Каждому единичному измерению растительности соответствует ближайшее по времени измерение интенсивности солнечного света. Также каждому измерению белой панели приводится в соответствие ближайшее по времени измерение освещенности. Далее рассчитывается соотношение измерений стационара в момент проведения единичных измерений растительности и белой панели. Таким образом устанавливается, насколько изменились условия освещенности в промежуток времени от съемки эталонного тела до проведения измерения растительности.

Для расчета этого показателя выбран инфракрасный (ИК) канал спектрометра SpectroSense-2, середина которого приходится на 870 нм. Изменение интенсивности солнечной радиации в этом канале экстраполируется на измерения на всех длинах волн. Полученный коэффициент учитывается при расчете КСЯ по формуле (1):

$$\text{КСЯ}_\lambda = \frac{V_\lambda * c_\lambda}{W_\lambda * k}, \qquad (1)$$

где КСЯ$_\lambda$ – коэффициент спектральной яркости при единичном измерении растительности на длине волны λ, V_λ – единичное измерение растительности на длине волны λ, c_λ – стандартный коэффициент отражения эталонного тела на длине волны λ, W_λ – ближайшее по времени единичное измерение эталонного тела на длине волны λ, k – корректирующий коэффициент освещенности, рассчитываемый по формуле (2):

$$k = \frac{B_v}{B_w}, \qquad (2)$$

где B_v – единичное измерение стационарного спектрометра на длине волны λ, ближайшее к измерению растительности V_λ, B_w – единичное измерение стационарного спектрометра на длине волны λ, ближайшее к измерению эталонного тела W_λ.

После расчета КСЯ по результатам каждого измерения производится осреднение значений отражательной способности на каждой длине волны по повторностям для расчета среднего спектрального образа каждого исследуемого объекта. Полученный образ изучаемых объектов визуализируется в виде спектральной кривой.

Участок 2. Многозональная съемка для изучения степени засоренности посевов сои и кукурузы

В ходе работы на втором участке проведена беспилотная аэросъемка сельскохозяйственных полей с целью определения степени засоренности посевов. Изучены опытные делянки сои и кукурузы, обработанные различными гербицидами в нескольких концентрациях. Беспилотная съемка выполнена с использованием многозональной камеры Sequoia. Пространственное разрешение полученных изображений составляет 8,24 см.

На каждой опытной делянке проведены описания видового состава сорной растительности. Для этого случайным образом в границах делянки определялся квадрат размером 50×50 см. Внутри квадрата подсчитывалось количество культурных и сорных растений каждого вида. Каждый описываемых участок сфотографирован цифровой камерой Olympus SP-500 для учета степени засоренности и видового состава растительности. Для дальнейшей работы все фотографии были кадрированы по маске рамки, в границах которой велось описание растительности.

На следующем этапе определено проективное покрытие (ПП) растительности на каждом фото. Для этого рассчитана разность интенсивности отраженного излучения по формуле (3):

$$VI = G - R, \quad (3)$$

где G – зеленый канал, R – красный канал.

В результате получено разностное изображение. Затем подобрано пороговое значение разности, по которому растительность может быть отличена от почвы, включая освещенные и затененные участки. Результат представляет собой бинарное изображение с разделением всех пикселей на классы растительности и почвы (рисунок 2).

Далее рассчитано ПП как отношение суммы пикселей класса растительности к общему числу пикселей фотографии. Значение выражено в процентах.

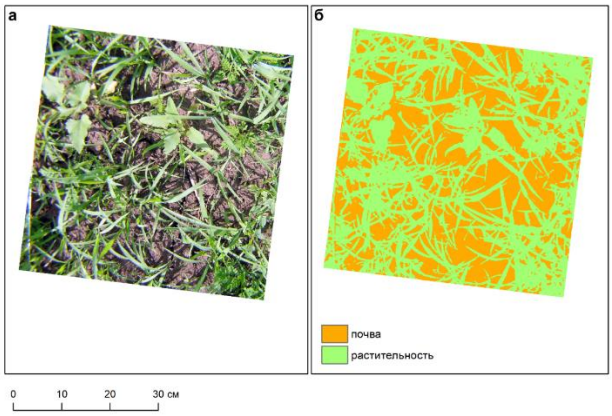


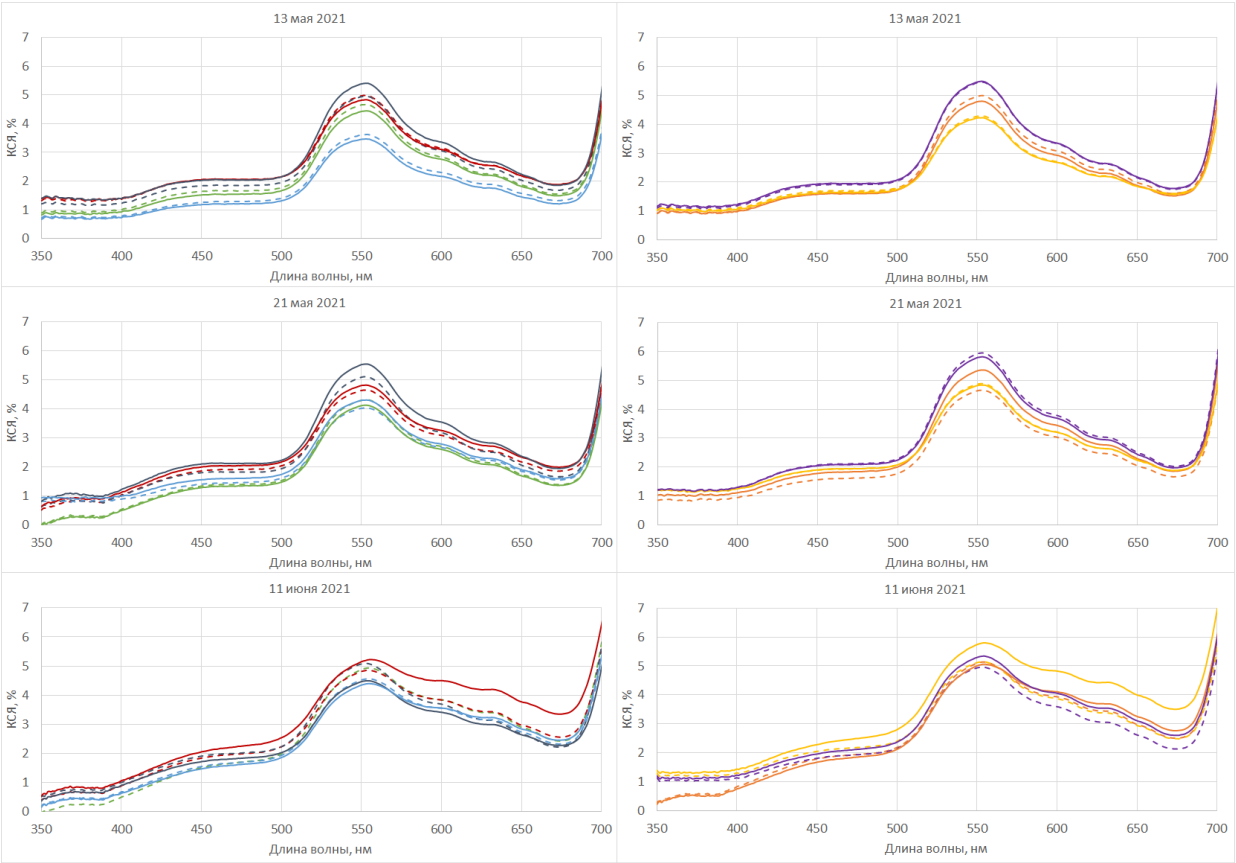
Рисунок 2 – Делянка кукурузы 11.06.2021 а) фото б) кластеризованное бинарное изображение

Результаты

Участок 1. Наземное спектрометрирование и многозональная аэросъемка для изучения грибковых болезней озимой пшеницы

Получены спектральные кривые изученных сортов озимой пшеницы. Существенные изменения отражательной способности растений отмечены после 13 мая, то есть через две недели после искусственного заражения посевов. Спектральные характеристики в видимой части спектра всех сортов на характерные даты начальной (13 мая), средней (21 мая) и конечной (11 июня) стадий развития болезней представлены на рисунке 3.

Наиболее значимые различия отражательной способности изучаемых объектов проявляются в красной зоне электромагнитного спектра (630–700 нм) – зараженные растения менее интенсивно поглощают красный свет. В большинстве случаев в зеленом спектре здоровые и инфицированные растения имеют близкие характеристики, что говорит о сложности детектирования заболеваний визуальным способом на основе признаков завядания.



	Аксинья	Бонус	Курень	Краснодарская 99	Безостая 100	Гром	Сварог
Контроль							
Заражен							

Рисунок 3 – Графики средних КСЯ в видимом диапазоне разных сортов озимой пшеницы на характерные этапы развития культуры и заболеваний

В БИК-диапазоне наиболее существенные различия между здоровыми и инфицированными посевами отмечены в диапазоне 770–920 нм (рисунок 4). Пораженные болезнью растения значительно слабее отражают инфракрасное излучение. Даже устойчивые к поражению грибковыми болезнями сорта Курень, Бонус и Сварог показывают значительно большее отражение в БИК части спектра у здоровых растений, чем у зараженных.

На следующем этапе работы сопоставлены динамика спектральных характеристик посевов на всем периоде созревания с ходом развития грибковых заболеваний. Для этого анализа вычислена средняя общая площадь поражения листовой поверхности всеми выявленными болезнями. Полученная величина сопоставлена с динамикой узкоспектральных вегетационных индексов $NDVI_{705,\ 750}$, ARI_{750}, MCARI. Наилучший результат показал индекс MCARI, чувствительный к отношению количества хлорофилла – пигмента, преобладающего в здоровых зеленых растениях к содержанию каротиноидов и антоцианов, в больших количествах присутствующих в тканях угнетенной растительности (рисунок 5).

Снижение общего количества хлорофилла в период от начала наблюдений до 24–27 мая обусловлено влиянием заболеваний, тогда как после 27 мая тенденция к уменьшению количества зеленого пигмента в основном связана с переходом культуры в стадию созревания. Узкоспек-

тральный вегетационный индекс демонстрирует изменение спектральных характеристик посевов до визуального проявления болезней. На контрольных делянках всех сортов отмечено выраженное снижение величины индекса MCARI, хотя визуально поражение болезнью отмечено в слабой степени.

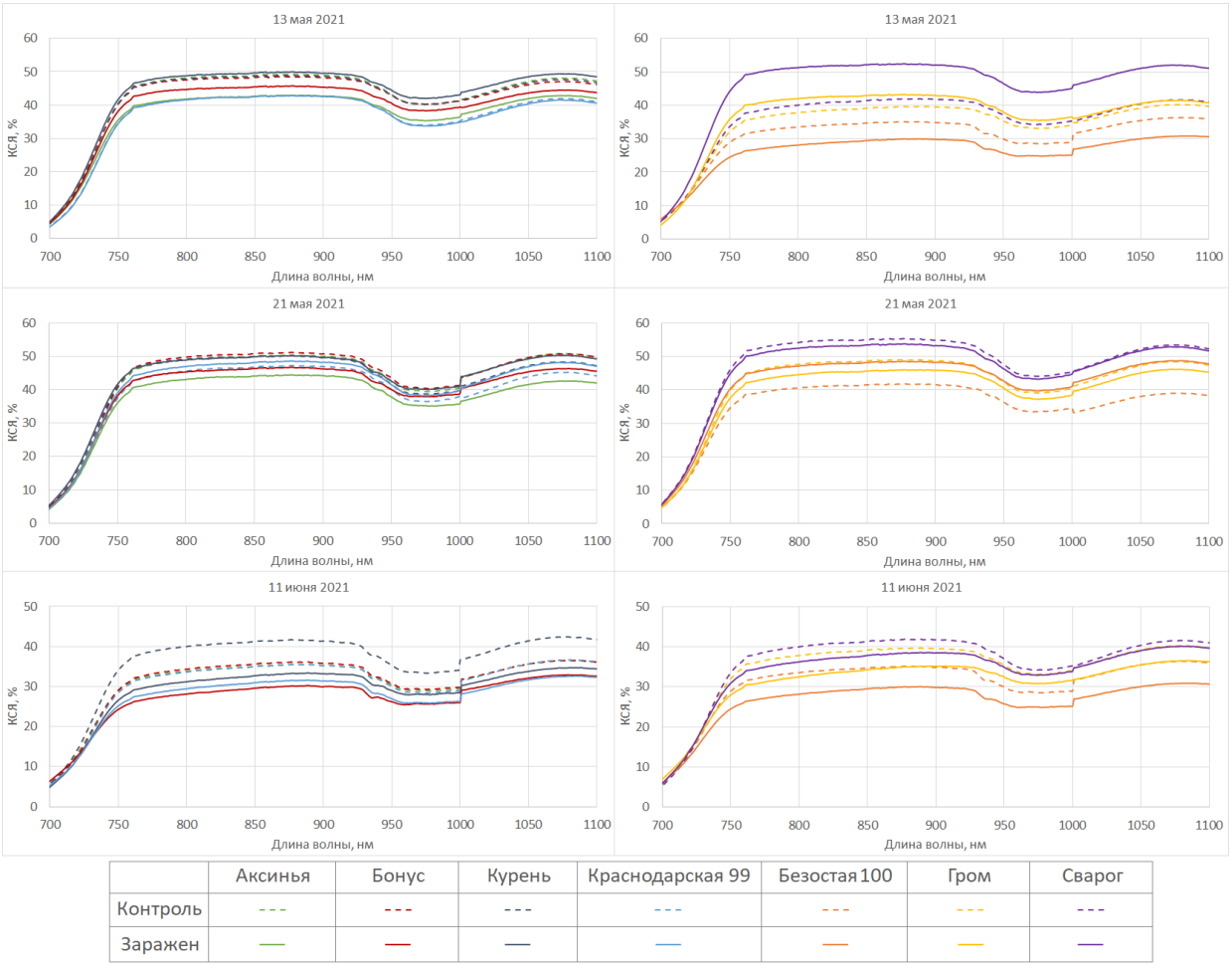


Рисунок 4 – Графики средних КСЯ в БИК-диапазоне разных сортов озимой пшеницы на характерные этапы развития культуры и заболеваний

Участок 2. Многозональная съемка для изучения степени засоренности посевов сои и кукурузы

На рассмотренной фазе всходов культурных растений ПП практически полностью создается сорной растительностью, находящейся в стадии активной вегетации. Целесообразно определить ПП по беспилотной аэросъемке, поскольку полученный результат будет характеризовать засоренность делянки. Для этой цели рассчитаны некоторые вегетационные индексы для контрольных участков, где проводилось геоботаническое описание.

Для анализа выбраны индексы, основанные на соотношении БИК и зеленого каналов (GNDVI, CIg), БИК и красного диапазонов (NDVI), всех трех перечисленных частей спектра (MSAVI2, CVI, MTVI2). Также с использованием БИК и краевого красного каналов рассчитаны NDVIre, SRre, CIre, а индекс RTVIcore задействует в расчете зеленый, краевой красный и БИК каналы.

Для каждого индекса проведена оценка его связи с ПП. Расчеты выполнены отдельно для делянок с посевами каждой культуры (соя и кукуруза), отдельно для каждой даты (28 мая и 10 июня), а также

по всей совокупности имеющихся данных без разделения на наборы данных по культурам и датам. Обнаружены индексы, пригодные для интегральной оценки ПП вне зависимости от видового состава культурной и сорной растительности. Кроме того, выявлены индексы с приемлемой чувствительностью как в областях низкого ПП, характерного для первой даты проведения съемки, так и при высоком ПП во вторую съемку. Диаграммы рассеяния представлены на рисунке 6.

Рисунок 5 – Графики временного изменения вегетационного индекса MCARI (по левой оси) в сравнении со средней площадью листовой поверхности, пораженной болезнью (по правой оси), на исследуемых сортах озимой пшеницы

Для вегетационных индексов GNDVI и CIg отмечен высокий коэффициент детерминации в сочетании с компактной формой облака рассеяния. Для индекса RTVIcore характерны различные типы зависимости в областях низких и высоких значений, что заметно по образованию двух облаков точек. Наибольший линейный коэффициент детерминации выявлен у вегетационного индекса MTVI2. Для этого индекса наибольшие значения R^2 отмечены также при отдельном анализе культур и дат сбора полевых данных, что делает его хорошим интегральным показателем для оценки ПП в различных условиях. Немногим меньшие величины коэффициента детерминации характерны для индекса MSAVI2.

Также изученные индексы показали схожие значения коэффициента детерминации на участках с посевами обеих культур, однако корреляция по делянкам, засеянным соей, во всех случаях несколько выше. Вероятно, это обусловлено более равномерным растительным покровом на делянках кукурузы, сформированным большим количеством мелких сорняков, тогда как на делянках сои часто встречается крупнолистовая сорная растительность, контрастно выделяющаяся на фоне открытой почвы.

Аналогично получены результаты для раздельного анализа данных по датам. Примечательно, что все индексы в таком случае имеют значительно более слабые связи

с ПП. Это может быть связано с необходимостью рассматривать данные для области как низких, так и высоких значений ПП в процессе построения закономерности. Ярко выделяется NDVI, который становится полностью неэффективным в диапазоне высоких значений ПП. Относительно высокие значения R^2 в обе даты демонстрируют вегетационные индексы MSAVI2 и MTVI2.

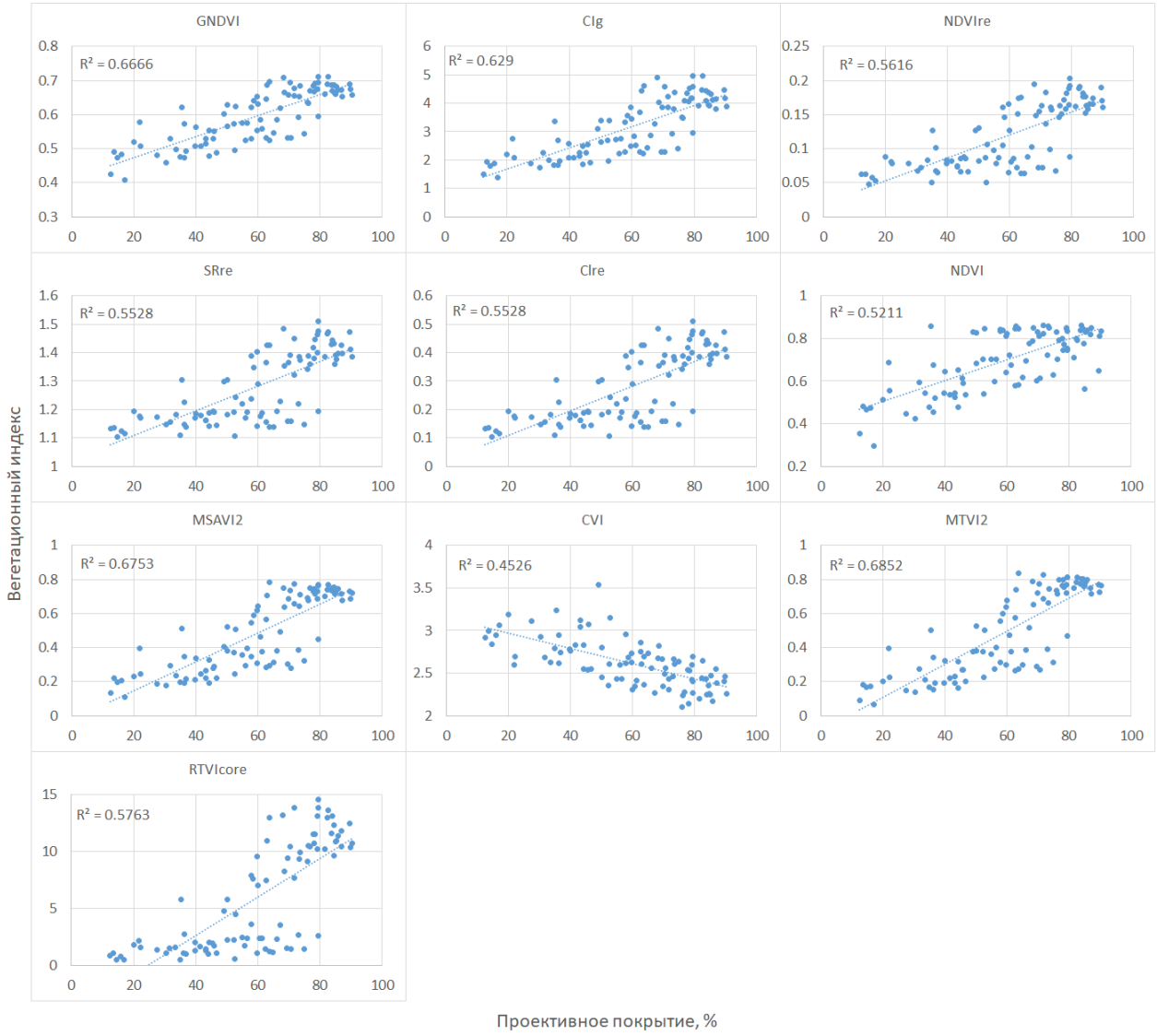


Рисунок 6 – Коэффициент детерминации линейной связи величины вегетационного индекса с ПП

Вегетационный индекс MTVI2 выбран для дальнейшего моделирования связи спектрального образа посевов и ПП изучаемой растительности. Однако для аппроксимации выбрана экспоненциальная модель для лучшего описания закономерности в диапазоне высоких значений ПП. Для расчета уравнения использовано 85 % имеющихся данных, то есть информация о среднем значении индекса и ПП для 77 участков ботанического описания. Еще 15 % (13 участков) далее использованы в проверке корректности полученного уравнения. Результирующая диаграмма рассеяния показана на рисунке 7.

Для описания зависимости величины вегетационного индекса MTVI2 получено уравнение (4) следующего вида:

$$MTVI2 = 0.096e^{0.0247ПП}, \quad (4)$$

где *MTVI2* – величина вегетационного индекса MTVI2 пикселя изображения, *ПП* – величина проективного покрытия в пределах пикселя изображения в процентах.

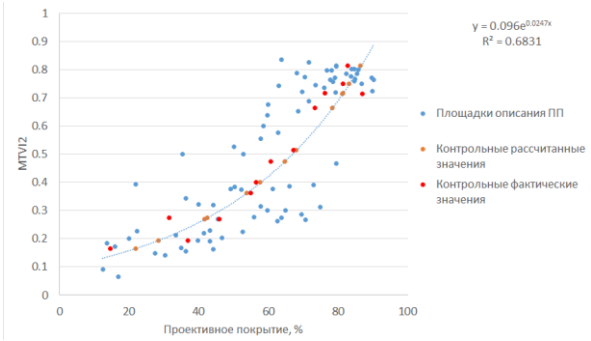


Рисунок 7 – Зависимость величины вегетационного индекса MTVI2 от ПП

Далее получены средние расчетные значения ПП для контрольных участков. На 77 % участков отклонение вычисленных значений от фактических не превышают 10 %. По обратному уравнению смоделировано значение ПП для всех изучаемых делянок. Результаты расчета по съемке от 28 мая с низкими величинами ПП представлены на рисунке 8.

Спустя две недели после внесения гербицидом, 28 мая, выделяются контрольные делянки, на которых обработка не производилась. Также заметно постепенное снижение ПП в ряду делянок с увеличением концентрации гербицидного препарата.

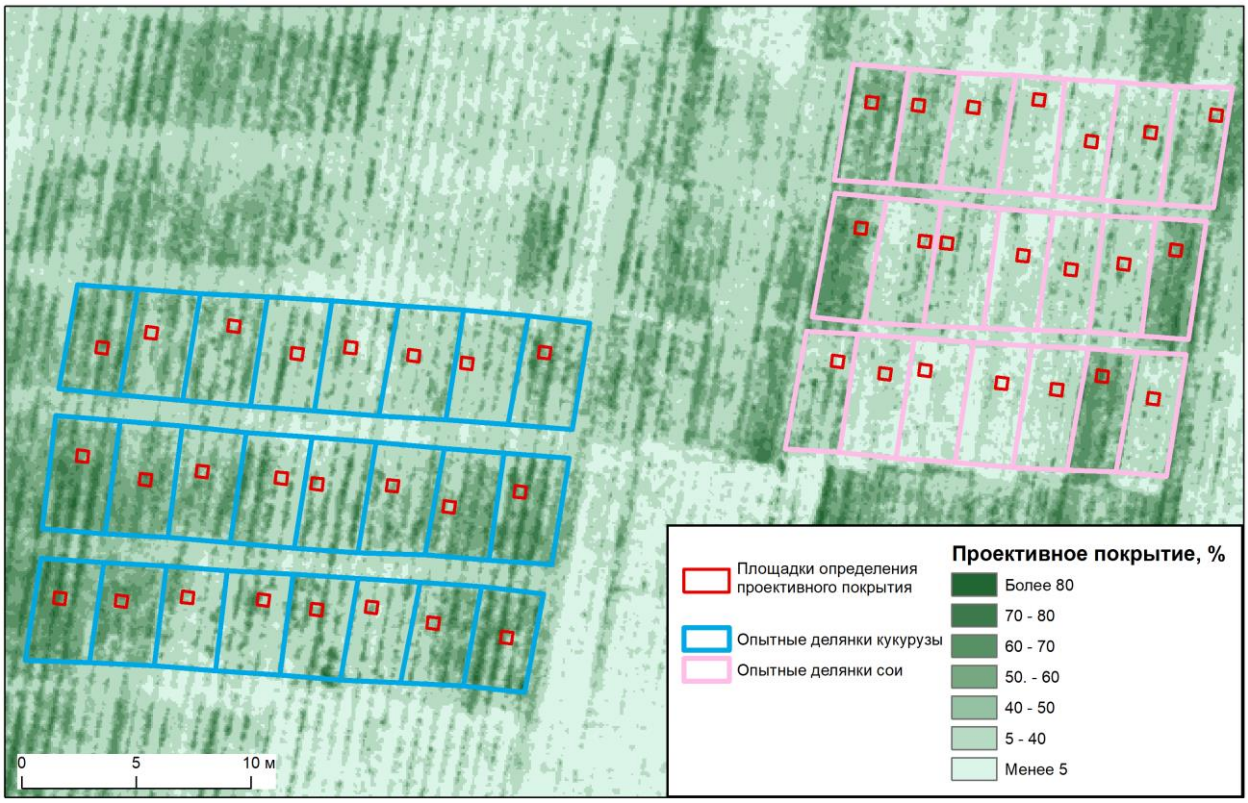


Рисунок 8 – Модель проективного покрытия на основе вегетационного индекса MTVI2 на 28 мая

Заключение

Сельскохозяйственные культуры представляют собой сложный объект для дистанционных исследований вследствие высокой комплексности факторов, оказывающих влияние на развитие растений. Различные подходы к применению высокодетальных дистанционных данных, их совместное использование, позволяют своевременно реагировать на негативные изменения состояния посевов. По проведенному исследованию получены следующие выводы:

Грибковые заболевания развиваются на посевах озимой пшеницы без ярких видимых проявлений на листьях около двух недель, однако в это время уже возможно их детектирование по узкоспектральным вегетационным индексам;

Для оценки ПП разреженной растительности наилучшим образом подходят вегетационные индексы, включающие в расчет БИК (700–870 нм) и зеленый (510–570 нм) или БИК (700–870 нм) и красный (670–750 нм) каналы;

Существуют вегетационные индексы, пригодные как для анализа ПП только в определенной области величин занятой растительностью площади, так и для интегральной оценки в широком диапазоне соотношения площадей открытой почвы и растительности, что делает моделирование ПП на основе величины вегетационного индекса эффективным методом изучения засоренности сельскохозяйственных полей.

Список литературы

Данилов Р.Ю., Кремнева О.Ю., Исмаилов В.Я., Третьяков В.А., Ризванов А.А., Кривошеи В.В., Пачкин А.А. Общая методика и результаты наземных гиперспектральных исследований сезонного изменения отражательных свойств посевов сельскохозяйственных культур и отдельных видов сорных растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т.17. – №1. – с. 113–127.

Деркачева А.А., Тутубалина О.В., Зимин М.В., Голубева Е.И. Применение авиационных гиперспектральных снимков и наземных данных для целей точного земледелия // Земля из космоса. – 2015. – спецвыпуск. – с. 43-46.

Кремнева О.Ю. Спектральные исследования зерновых культур для диагностики болезней // Защита растений в условиях перехода к точному земледелию / Материалы международной научной конференции, посвященной 50-летию со дня основания РУП «Институт защиты растений» / Минск: Изд-во «Колорград». – 2021. – с. 82–83.

Кремнева О.Ю., Тутубалина О.В., Середа И.И., Данилов Р.Ю., Зимин М.В., Курилов А.А. Исследования изменения спектральных характеристик сортов озимой пшеницы в зависимости от степени инфицирования возбудителями болезней // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т.17. – №3. – с. 149–161.

Плотников Д.Е., Колбудаев С.А., Барталев С.А. Выделение сезонно-однородных областей на основе анализа временных серий спутниковых изображений // Компьютерная оптика. – 2018. – Т.42. – №3. – с. 447–456.

Тутубалина О.В., Зимин М.В., Голубева Е.И., Микляева И.М., Вахнина О.В., Михеева А.И. Использование наземных и воздушных методов спектрометрических наблюдений для определения состояния сельскохозяйственных культур // Картография в цифровую эпоху. Серия Вопросы географии / М.: Издательский дом «Кодекс». – 2017. – Т.144. – 376-391 с.

Ченкин А.Ф. Методика по организации и учету вредных организмов / М.: Центр научно-техн. информации. – 1993. – 66 с.

Шумилов Ю.В., Ермоленко С.А., Савва А.П., Данилов Р.Ю., Мкртчян А. Г. Изучение возможности использования беспилотных летательных аппаратов для дистанционного мониторинга засоренности посевов сельскохозяйственных культур // Наука Кубани. – 2018. – №1. – с. 62–69.

Candiago S., Remondino F., De Giglio M., Dubbini M., Gattelli M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images // Remote sensing. – 2015. – Vol.7. – pp. 4026–4047.

Fieuzal R. Baup F. Forecast of wheat yield throughout the agricultural season using opticak and radar satellite images // International journal of applied Earth observation and geoinformation. – 2017. – Vol. 59. – pp. 147–156.

Gerhards M., Schlerf M., Mallick K., Udelhoven T. Challenges and future perspectives of

multi-/hyperspectral thermal infrared remote sensing for crop water-stress detection: A review // Application of spectroscopy in agriculture and vegetation research. – 2019. – Vol. 11(10).

Mariotto I., Thenkabail P.S., Huete A., Terrence Slonecker E., Platonov A. Hyperspectral versus multispectral crop-productivity modeling and type discrimination for the HyspIRI mission // Remote Sensing of Environment. – 2013. – Vol. 139. – pp. 291–305.

Mulla D. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps // Biosystems engineering. – 2013. – Vol. 114. – pp. 358–371.

Федеральная служба государственной статистики: Сельское хозяйство в России – 2019 г. [электронный ресурс]: https://gks.ru/bgd/regl/b19_38/Main.htm (дата обращения 08.03.2021).

Сведения об авторах

Валерия Владимировна Хлюстова – выпускница кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Елена Александровна Балдина – ведущий научный сотрудник кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук.

Возможности анализа городской активности на основе сетевых моделей

Шилякина М.Н., Карпачевский А.М., Котов Е.А.

Пространственное распределение движения в уличных сетях является важным компонентом функционирования и динамики города. Понимание эффектов, определяющих движение пешеходов и транспортных средств, имеет решающее значение для прогнозирования траектории движения и повышения эффективности, безопасности, устойчивости и благоустроенности городской среды. Уличная сеть является сложным случаем географических сетей, однако благодаря доступному и удобному в использовании программному обеспечению многие исследователи обращаются именно к сетевым показателям. В данной статье исследуется вопрос различия теории графов и пространственного синтаксиса в контексте анализа географических сетей. Данные различия отражаются в методиках расчета показателей, их нормализации, и, как следствие, рассматриваемые теории в разной степени применимы при картографировании городской активности. Авторами выдвигается гипотеза, что предсказательная способность пространственной дифференциации различных аспектов городской активности у теории пространственного синтаксиса выше, чем у теории графов.

Ключевые слова: географические сети, планировка улично-дорожной сети, сетевой анализ, пространственный синтаксис

Capabilities of urban activity analysis based on network models

The spatial distribution of traffic in street networks is an important component of urban functioning and dynamics. Understanding the effects that determine the movement of pedestrians and vehicles is critical to predicting the trajectory of traffic and improving the efficiency, safety, sustainability, and livability of the urban environment. The street network is a complex case of geographic networks, but due to affordable software, many researchers utilize network metrics. This article explores the question of the differences between graph theory and space syntax in the context of geographic network analysis. These differences are reflected in the methods of calculation of indicators, their normalization. The considered theories are applicable in varying degrees in the mapping of urban activity. The authors put forward the hypothesis that the spatial syntax theory has a higher predictive power of spatial differentiation of various aspects of urban activity than the graph theory.

Keywords: geographic network, street network, network analysis, space syntax

Введение

Планировочная структура города всегда оказывала влияние на перемещение населения внутри него. В городском планировании важно довести до возможного минимума средние затраты времени на поездки жителей. На протяжении последних 20 лет в планирование городов начало внедряться сетевое моделирование, возможности которого не до конца изучены и оценены в нужной мере. В ходе развития исследования городов наравне с теорией графов начал применяться *space syntax* (пространственный синтаксис) – это совокупность теорий и методов анализа конфигураций городской среды.

Теория *space syntax* – это метод описания и анализа взаимосвязей между пространствами городских районов и зданиями [Hillier, Hanson, 1986]. Более трех десятилетий назад *space syntax* был предложен как машинный метод для описания пространственных моделей городов. Понятие синтаксиса, унаследованное от лингвистики, применяется к различным взаимодействиям общества и пространства. Данный метод основывается на том, что пространственная структура оказывает сильное влияние на социальную деятельность человека и его поведение в городских условиях. *Space syntax* применяется в урбанистических исследованиях, связанных с описанием и анализом пространственных закономерностей в городе, например, моделей перемещения людей в городе и т.д.

Первоначальная идея *space syntax* заложена в понимании развития застройки и направлений перемещения внутри города. Одним из первых использовался метод осевых линий, который заключается в представлении видимости наибольшей дальности между двумя точками пространства в контексте непрерывного движения. Набор осевых линий, которые взаимно пересекаются и охватывают все свободное пространство, называется осевой картой, которая составляет наименьшее число самых длинных осевых линии. В противном случае, полученные карты для одной и той же территории могут сильно отличаться [Hillier, Hanson, 1986].

Исследование синтаксиса пространства показало, что только пространственная конфигурация объясняет значительную долю различий между совокупными скоростями передвижения людей в разных местах как в городском пространстве, так и внутри зданий. Остается вопрос, почему они движутся именно таким образом, так как анализ не содержит явных представлений о мотивации людей. Один из возможных объяснений предсказательной силы метода заключается в том, что то, как люди воспринимают окружающее пространство и принимают решения выбора маршруте, каким-то образом неявно встроено в анализ синтаксиса пространства [Penn, 2003].

В последние годы появилось несколько других подходов к сетевому анализу городских сетей. Среди них был предложен ряд метрических показателей графов, которые отличаются от методов топологического анализа графов space syntax [Porta, Crucitti et al., 2005]. Поскольку большинство показателей теории графов были разработаны для того, чтобы сосредоточиться на свойствах узлов, форма представления графов через сегменты позволяет сосредоточиться на линиях. Например, центральность по степени в *space syntax* описывает количество соседних осевых линий, которые пересекаются с конкретной осевой линией, представляющей интерес. Для применения алгоритмов сетевого анализа из теории графов к модели уличной сети ее необходимо преобразовать в представление графа: математическое представление, состоящее из вершин, соединенных ребрами с весами [Jiang, Claramunt, 2004]. При анализе уличной сети в качестве основных элементов исследования можно взять сами улицы и представить их в виде вершин графа, а соединения между улицами (т. е. перекрестки или пересечения) – в виде ребер соответствующего графа. Аналогично, уличная сеть может быть представлена осевой картой [Hillier, Hanson, 1986], и был проведен анализ, в котором эти осевые линии представлены вершинами графа, а пересечения между осевыми линиями – ребрами [Marshall et al., 2018].

На данный момент сохраняется неопределенность в различии теории графов и *space syntax*, поскольку при анализе городов с использованием этих двух подходов

выводы достаточно похожи. Также ранее не проводились исследования с применением как теории графов, так и *space syntax* в равной мере на примере множества городов.

Цель нашего исследования – оценка эффективности подходов сетевого анализа и теории *space syntax* для комплексного моделирования и картографирования городской активности. Эффективность подхода определяется его способностью предсказывать концентрацию городской активности. Под городской активностью подразумевается совокупность действий, выполняемых людьми в пределах города и на территориях, находящихся под их непосредственным влиянием, например, трафик, спрос и аренда недвижимости, расселение и прочее.

Материалы и методы

Для исследования были выбраны следующие города: Ярославль, Кострома, Волгоград, Екатеринбург, Магнитогорск. Было принято решение не рассматривать малые города, так как в таком масштабе могут возникнуть трудности в анализе из-за плохой масштабируемости показателей на основе неполных исходных данных о городской активности. Рассматриваемые города различны по истории возникновения, численности населения, планировке, что позволит сравнить эффективность методов сетевого анализа и теории *space syntax* в различных условиях.

- *Ярославль* – это средневековый город, основанный в 1010 году на волжском торговом пути. В период нового времени значение города снизилась. Планировка улично-дорожной сети радиально-кольцевая. Основа исторической планировки сохранена.
- *Кострома* – средневековый город на торговом пути по Волге, основанный в 1152 году. В XVIII веке планировка улично-дорожной сети развивается как регулярная, однако в центре сохраняется радиально-кольцевая.
- *Волгоград* основан как сторожевой форпост в Поволжье в 1589 году. В XIX веке превращается в промышленный центр региона, активно развивающийся в эпоху индустриализации. Город имеет протяженную вдоль берега Волги структуру, что обусловило трассировку магистральных улиц параллельно реке и перпендикулярно к ней, с преобладающим транспортным значением продольных магистралей. Имеет квартальную регулярную планировку, является городом-миллионником.
- *Екатеринбург* – город нового времени, основан в 1781 году как промышленный город на Урале. На данный момент город-миллионник, имеющий регулярную планировку.
- *Магнитогорск* – город новейшего времени, основанный в 1929 году. Возникает как промышленный центр в эпоху индустриализации, а в историческом ядре сохранилась квартальная планировка. Особенности застройки связаны с индустриальными методами строительства и характерными методами проектирования городского пространства эпохи модернизма.

В рамках исследования данные о городской активности были предоставлены компанией «SmartLoc». Первый тип данных – это пешеходный трафик, который представлен в виде точечных объектов, где каждая точка – отдельный объект, содержащий показатели трафика в пределах области радиусом 25 м. Данные пешеходного трафика были получены на основе исследования более 50 важных факторов и внешних данных на предмет взаимосвязи с показателями реальных полевых замеров выполненных компанией «SmartLoc» в период 2013 – 2020 г. Следующий тип данных – автомобильный трафик, представленный в виде линейных пространственных объектов, где для каждого сегмента рассчитано среднее

количество машин за сутки. Сегменты ограничены перекрестками и другими качественными изменениями дорожной сети. Данные о местоположении организаций по городу были получены из открытых данных, которые представляют собой название и тип объекта. Информация о коммерческой недвижимости представлена в виде типа помещения, цены и площади и была получена путем обращения к API (Application Programming Interface) четырех сайтов: Циан (https://www.cian.ru/), Яндекс (https://realty.yandex.ru/), Авито (https://www.avito.ru/moskva/nedvizhimost) и n1 (https://moskva.n1.ru/).

Кроме вышеописанных данных, интерес для исследования представляет транспортная сеть городов. Для каждого города, за исключением Костромы, были получены маршруты трамваев (для Костромы были скачаны маршруты троллейбусов) из открытого источника данных OpenStreetMap. Слой с маршрутами соединялся на основе геометрии с графом дорог, после чего происходил расчет показателя количества проходящих маршрутов через рассматриваемый сегмент.

Полученные данные городской активности были растеризованы. Размер ячейки растра был выбран одинаковым для всех городов и равняется 50 м. Данное значение было подобрано эмпирически, исходя из средних расстояний между точками в разных городах и с учетом того, чтобы расчеты на больших городах не происходили слишком долго. В случае пешего трафика в интерполяции использовалось значение количества людей за сутки. Для недвижимости использовалось значение цены аренды или продажи помещения. Стоит отметить, что данные коммерческой недвижимости требовали агрегации по уникальным значениям. Это связано со спецификой данных, так как некоторые объявления дублировались. С точками предоставления услуг было решено отобрать несколько наиболее популярных и многочисленных категорий [Lin et al., 2018]: «продукты питания», «средства связи», «одежда» и «общественное питание».

Улично-дорожная сеть была преобразована в неориентированный граф, где окончания улиц и их сегментов превращаются в узлы графа, а сами улицы и сегменты – в ребра. Длина каждого сегмента улицы связана с соответствующим ребром. Таким образом, учитывается как топология, так и метрические расстояния уличного графа. Оценка важности узла основана на различных мерах центральности узла и иных показателях. Выбор показателей обусловлен тем, что они связаны с выбором маршрутов, то есть, с построением кратчайших путей.

Центральность по промежуточности (*betweenness centrality*) определяется как доля кратчайших путей, проходящих через вершину или ребро [Barthélemy, 2011]. Мы рассчитывали центральность для ребер (1).

$$C_b = \sum \frac{de_j^i}{d_j^i} \quad (1),$$

где de_j^i – количество кратчайших путей между всеми узлами, проходящие через ребро e; d_j^i – сумма кратчайших путей между всеми узлами.

Центральность по близости (*closeness centrality*) определяется обратной величиной средней длины кратчайших путей к или от всех других вершин графа [Barthélemy, 2011] (2):

$$C_c = \frac{1}{\sum di}, \qquad (2)$$

где di – сумма кратчайших расстояний до других узлов.

Хотя и центральность по близости, и центральность по промежуточности часто используются в сетевом анализе, центральность по прямолинейности (*straightness centrality*) специфична именно для уличных сетей, поскольку в ней используется метрическое расстояние [Porta et al., 2005]. Она

измеряется как сумма отношений между действительным и евклидовым расстоянием от каждого узла до каждого другого (3):

$$C_p = \sum \frac{dEu_j^i}{d_j^i} \text{ , (3)}$$

где $dEu_j{}^i$ – евклидово расстояние между узлом i и j; d_j^i – кратчайший путь между узлом i и j.

Существует альтернативная концепция, которая заключается в построении *дуального графа*, в котором ребра исходного графа становятся узлами, а вершины – ребрами. Это более сложная концепция, в которой географическое расстояние теряется, так как ребра не имеют длины, но становится возможным определить угол между соединенными улицами и, соответственно, угловую центральность по близости (*angular closeness centrality*), рассчитываемую для ребер (рисунок 1).

Большинство сетевых показателей опираются на кратчайшие пути и рассчитываются без использования информации о реальных возможностях перемещения по графу. Наглядным примером является перекресток с улицей, на которой есть одностороннее движение. Согласно правилам дорожного движения, мы не сможем повернуть в сторону, противоположную направлению движения на этой улице. Подобного рода информация существует в базе OpenStreetMap. Существующие библиотеки языка программирования Python, работающие с графами, не позволяют работать с расширенной сетевой моделью. Такая возможность существует в ArcGIS и Open Source Routing Machine (OSRM). Для расчета кратчайших путей было решено использовать открытый ресурс OSRM.

В расчетах использовалась концепция центральности на основе случайных блужданий (*random walk centrality*). Она была предложена [Newman, 2005] в качестве альтернативы классическим центральностям, основанным на всех кратчайших путях. При использовании классической центральности по промежуточности подразумевается, что пешеходы в городе, перемещаются только по кратчайшим путям. *Random walk centrality* ослабляет это предположение: сохраняя преимущественный вес кратчайших путей, данная концепция позволяет рассматривать альтернативные маршруты через граф. Такой учет множества путей будет выглядеть более реалистичным описанием движения пешеходов, которые не обладают совершенным знанием географии города.

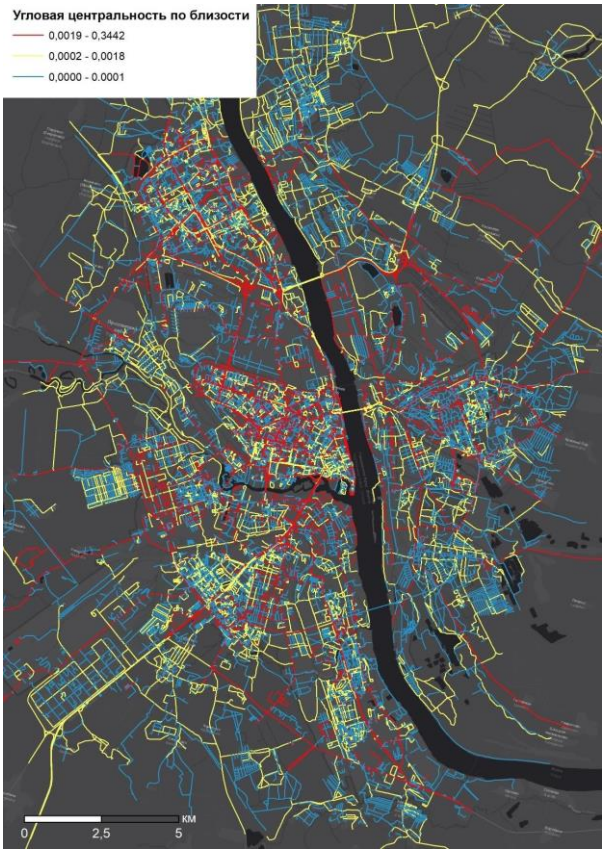


Рисунок 1 – Угловая центральность по близости г. Ярославля

Было допущено три приближения в связи с очень большими временными затратами на расчеты. Первое приближение связано с тем, что из всех точек графа были выбраны те, у которых инцидентность больше 2, то есть рассматривались только перекрестки, как важные узлы в перемеще-

ниях по городу. Второе приближение заключается в том, что из них случайным образом выбирались 8 % точек [Sean, 2019], которые использовались для построения маршрутов. Третье допущение в расчетах связано с тем, что кратчайший путь от точки А до точки Б равен кратчайшему пути от точки Б до точки А. Так как узлы графа расположены неравномерно, и большинство точек расположено близко друг к другу, в большинстве близко к действительности.

Полученный слой с кратчайшими путями соединялся на основе геометрии с исходным графом дорог для того, чтобы получить информацию идентификатора ребра. После через агрегирование идентификатору происходил расчет количество кратчайших путей для каждого ребра. В результате мы получаем показатель центральности по промежуточности на расширенной сетевой модели, который означает количество кратчайших путей, проходящих через рассматриваемое ребро.

Для работы с показателями теории пространственного синтаксиса был выбран плагин Place Syntax Tool (PST) для QGIS. *Angular integration* представляет собой угловое расстояние между одной линией и каждой другой линией в сети, используя кратчайшие пути. Угловое расстояние определяется как накопленные угловые повороты, необходимые для того, чтобы добраться от линии А до линии В в сети по кратчайшему пути. Угловое расстояние измеряется в градусах, а затем делится на 90 [Iida and Hillier, 2005].

Для показателя *angular choice* выполняется обход путей от А до В, первоначально с оценкой 1, и для каждой развилки пути оценка делится поровну между развилками [Hillier et al., 2012; Turner, 2005]. Когда впоследствии развилки соединяются, их соответствующие оценки суммируются по мере того, как обход продолжается в направлении В. Во время обхода каждый пройденный сегмент получает текущую оценку текущего развилки.

Результаты

Для сравнения показателей из теории графов и теории *space syntax* был выбран линейный коэффициент корреляции Пирсона, который применяется для исследования взаимосвязи двух переменных. Прежде, чем приступить к расчетам, необходимо было перейти от векторного представления объектов города с точечной и линейной локализацией к растровому. Это было сделано через вычисление плотности значений точечных или линейных объектов с использованием сглаживающей ядерной функции.

Рассмотрим каждое явление отдельно на примерах пяти городов. В случае торговых комплексов благоприятная ситуация наблюдается для показателей *space syntax*: значения корреляции находятся между 0,6 (Ярославль) и 0,7 (Кострома). В Магнитогорске. Костроме и Екатеринбурге наблюдается связь с центральностью по прямолинейности.

У продуктовых магазинов связь с сетевыми показателями практически отсутствует. Во всех городах, кроме Магнитогорска, наблюдается корреляция между плотностью точек общественного питания и *angular choice*, причем в наибольшей степени у г. Кострома. В Екатеринбурге, Волгограде и Костроме центральности по близости и прямолинейности также слабо средне связаны с плотностью точек общественного питания. При анализе данных стоимости аренды коммерческой недвижимости выдвигалась гипотеза, что ценообразование связано с городской активностью. В итоге отсутствие связи с сетевыми показателями не подтверждает данную гипотезу.

Пешеходный трафик имеет самые высокие значения корреляции с сетевыми показателями. Исключение составляет цен-

тральность по промежуточности (за исключением г. Магнитогорск) и в случае Ярославля – центральность по промежуточности на расширенной сетевой модели.

Рисунок 2 – Карта центральности по промежуточности и автомобильного трафика для г. Ярославля

Автомобильный трафик коррелирует с сетевыми показателями по-разному. Если говорить в целом, то во всех городах, кроме Екатеринбурга, автомобильный трафик имеет уверенную среднюю связь со всеми сетевыми показателями за исключением обеих центральностей по близости (рисунок 2). Для Екатеринбурга весомое значение имеют оба показателя центральности по промежуточности.

Плотность маршрутов общественного транспорта имеет связь только для городов Магнитогорск и Кострома, как наименьших по численности из рассматриваемых. Для города Магнитогорска корреляция наблюдается с *angular choice* и центральностью по промежуточности на расширенной сетевой модели. Для Костромы набор показателей больше – это оба показателя *space syntax*, центральность по прямолинейности и центральность по промежуточности на расширенной сетевой модели.

Обсуждение

Таким образом, мы можем отметить, что наблюдаются типичные для всех рассмотренных городов зависимость пешего и автомобильного трафиков практически от всех сетевых показателей, в особенности от *angular integration* и *angular choice*. Рассмотрим на конкретных городах и показателях, как можно объяснить полученные результаты.

В случае города Екатеринбурга наблюдается взаимодействие трех основных улиц: проспекта Ленина, улицы Первомайской и улицы Малышева. Эти улицы развивались на протяжении всей истории города с ориентацией на исторический центр и реку Исеть, на которой расположен Екатеринбург. Улицы параллельны друг другу, имеют много связей, что подтверждается высокими показателями центральностей и *angular integration* и *choice*. Регулярная планировка обуславливает высокие показатели корреляции центральности по связности, промежуточности и прямолинейности, показателей *space syntax* и движения в городе, особенно пешеходного (рисунок 3).

Рост городской территории, увеличение количества населения, развитие внутренней инфраструктуры стали определяющими факторами для повседневной жизни Костромы и Ярославля на рубеже XIX–XX вв. В связи с этим более важную роль в структуре губернских центров стала играть транспортная сеть, обеспечивающая связь между отдельными их частями. В Ярославле к началу XX в. возникла необходимость постройки железнодорожного моста через Волгу, который бы стал не только дополнительным транспортным узлом, соединявшим две части города, но и

напрямую объединил бы Ярославскую и Архангельскую железнодорожные ветки. Благодаря сохранению небольшого участка исторической регулярной застройки наблюдается корреляция между показателями связности и пешеходным трафиком. Причем стоит отметить, что корреляция между показателем центральности по связности на дуальном графе и пешеходным трафиком наблюдается лишь в городе Ярославле. Из этого следует вывод, что данный показатель связан не столько с планировкой города, сколько с морфометрическими особенностями улично-дорожной сети и взаимным местоположением улиц относительно друг друга без отнесения ее к какому-либо типу.

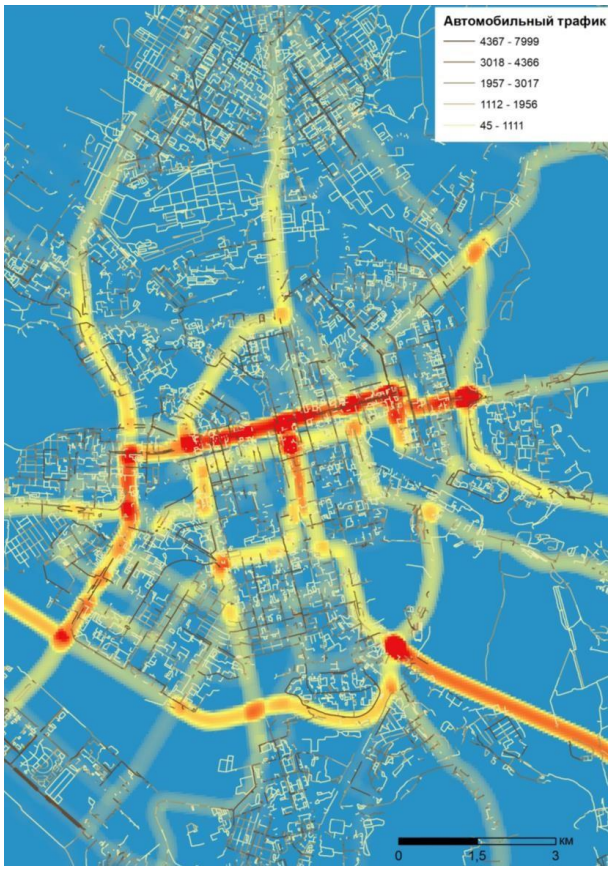


Рисунок 3 – Карта центральности по промежуточности и автомобильного трафика для г. Екатеринбурга

Развитая веерная форма сети города Костромы включает четыре полукольцевые и шестнадцать радиальных улиц. Центр города традиционно расположен у рассечения – на берегу Волги. Для Костромы уникальна зависимость между сетью троллейбусов и показателей теории *space syntax* и центральности по прямолинейности. Для радиально-кольцевой структуры мы наблюдаем зависимость между центральностью по промежуточности и автомобильного трафика в равной степени, как у показателей *space syntax* и обоих типов трафика. Для такой планировки мы также наблюдаем зависимость пешеходного трафика и центральности по близости.

Для Волгограда в 60–80-е гг. XX в. продолжалось формирование общегородского центра и насыщение общегородскими функциями прибрежной зоны Центрального района Волгограда, причем основная доля приходится на линейные участки. Наблюдается связь центральности по близости и пешеходного трафика, что обусловлено регулярной планировкой города. Несмотря на размер города, его особое расположение повлияло на сильную связь центральности по промежуточности на расширенной сетевой модели и автомобильного трафика (рисунок 4). Также только для Волгограда наблюдается связь между расположением точек общественного питания и *angular choice*, что тоже можно объяснить сложной структурой улиц города и его вытянутостью вдоль реки.

С начала строительства Магнитогорска и завода все проектные и строительные работы были подчинены главной задаче – скорейшему возведению крупнейшего металлургического предприятия. Тенденция сосредоточивать элементы благоустройства на общественных пространствах аллей и бульваров и оставлять неблагоустроенными дворовые пространства сохранилась в планировочной организации кварталов и микрорайонов 50-х, 60-х годов и последующего времени. Сеть маршрутов трамваев имеет сильную связь с показателями, использующих информацию о перекрестках

в большей мере, чем остальные. Речь идет об *angular choice* и центральностью по промежуточности на расширенной сетевой модели. Это можно объяснить характерной квартальной застройкой города.

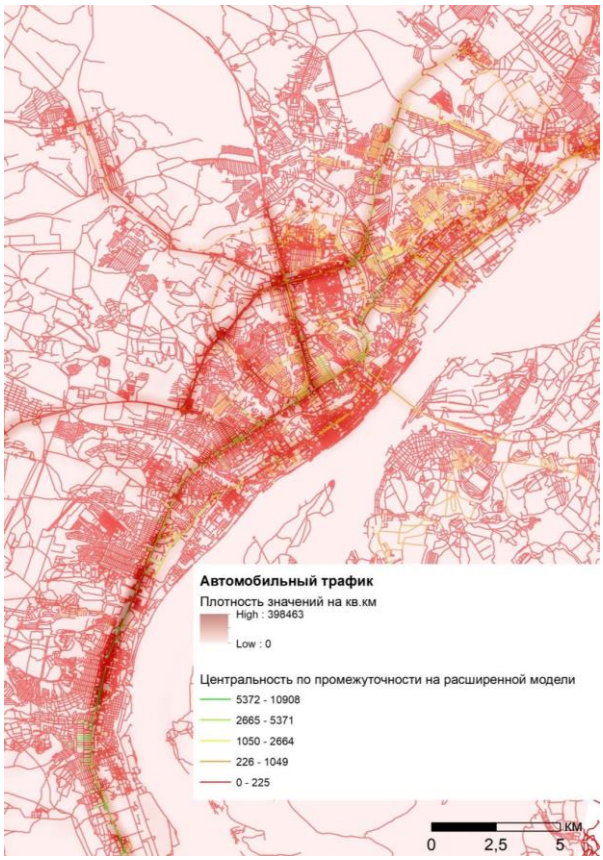


Рисунок 4 – Карта центральности по промежуточности на расширенной сетевой модели и автомобильного трафика для г. Волгограда

Также в городе наблюдается связь между расположением торговых комплексов и показателей, которые наиболее успешно предсказывают пешеходный трафик для всех городов, то есть, показателей *space syntax* и центральности по прямолинейности. Это говорит об успешном выборе локации для работы торговых комплексов.

Таким образом, оба показателя центральности по промежуточности хорошо коррелируют с автомобильным трафиком, однако показатель на расширенной сетевой модели имеет более сильную корреляцию с трафиком, поэтому можно сделать вывод, что в большом городе запреты на повороты оказывают влияние на расчет кратчайших путей. При этом, чем больше город, тем сильнее влияние. Стоимость коммерческой недвижимости практически нигде не коррелирует с сетевыми показателями, что означает, что ценообразование не ориентировано на городскую активность и зависит не от географических, а от социально-экономических факторов.

Перемещение пешеходов также обуславливается показателями теории *space syntax* и центральности по прямолинейности для всех городов. Корреляция связности и пешеходного трафика типична либо для строго регулярной застройки (квартальной), либо для радиально-кольцевой. Показатели *angular choice* и центральность по промежуточности на расширенной сетевой модели имеют связь с маршрутной сетью трамваев в случае квартальной планировки.

Заключение

Несмотря на своеобразные географические, исторические и социально-экономические механизмы, которые по-разному формировали различные городские районы, между дорожными сетями очень разных городов существует неожиданное количественное сходство. Связность дорожной сети обеспечивается перекрестками, узлами, где может произойти какое-то событие: изменение направления движения или потенциальные аварии. Объекты городской инфраструктуры могут быть исследованы по-разному. Например, улица может быть представлена как ребро, однако в городских исследованиях роль улиц воспринимается гораздо более комплексно. Таким образом, улица и уличная сеть являются самостоятельным многомерным объектом изучения, который невозможно полностью понять, если рассматривать его только как звено транспортной сети, как и любой другой.

В данной работе впервые были совместно проанализированы показатели тео-

рии графов и пространственного синтаксиса на примере городских данных пяти городов России. В ходе расчетов впервые была оценена степень взаимосвязи между этими показателями и показателями городской активности. Также впервые был предложен алгоритм для расчета центральности по промежуточности на расширенной сетевой модели.

По результатам исследования можно заключить, что показатели обеих теорий могут дополнять друг друга, но не являются взаимозаменяемыми. У показателей теории пространственного синтаксиса наблюдается более явная предсказательная способность не только для трафика, но и расположения точек предоставления услуг, маршрутов сети общественного транспорта. В будущих исследованиях предстоит уточнить характер связи между сетевыми показателями и размещением точек услуг, так как остается нераскрытым, что является первопричиной их расположения. Также возможно расширение списка показателей городской активности для анализа.

Список литературы

Barthélemy M. Spatial networks // Physics Reports. – 2011. – Vol. 499. – №. 1-3. – p. 1-101.

Hanna S.E. Random walks on weighted graphs: Centrality measures or simple agents // Proceedings of the 12th Space Syntax Symposium. – 2019. – 431-2.

Hillier B. Studying cities to learn about minds: Some possible implications of space syntax for spatial cognition // Environment and Planning B: Planning and Design. – 2012. – Vol. 39. – No.1. – pp. 12-32.

Hillier B., Hanson J. The social logic of space. – Cambridge university press, 1986. – 281 p.

Hillier B., Iida S. Network and psychological effects in urban movement // International Conference on Spatial Information Theory. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. – pp. 475-490.

Jiang B., Claramunt C. Topological analysis of urban street networks //Environment and Planning B: Planning and design. – 2004. – Vol. 31. – No.1. – pp. 151-162.

Marshall S., Gil J., Kropf K., Tomko M., Figueiredo L. Street network studies: from networks to models and their representations //Networks and Spatial Economics. – 2018. – Vol. 18. – No 3. – pp. 735-749.

Newman M.E. A measure of betweenness centrality based on random walks // Social networks. – 2005. – 27(1). – pp. 39-54.

Penn A. Space syntax and spatial cognition: or why the axial line? // Environment and behavior. – 2003. – Vol. 35. – No 1. – pp. 30-65.

Porta S., Crucitti P., Latora V. The network analysis of urban streets: A dual approach // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2006. – Vol. 369. – No 2. – pp. 853-866.

Turner A. Could a road-centre line be an axial line in disguise // Proceedings of the 5rd Space Syntax Symposium. – 2005. – Vol. 1. – pp. 145-159.

Сведения об авторах

Мария Николаевна Шилякина – выпускница кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Андрей Михайлович Карпачевский – старший научный сотрудник кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук.

Егор Андреевич Котов – старший преподаватель, научный сотрудник факультета городского и регионального развития Высшей школы урбанистики имени А.А. Высоковского.

Картографирование арктического острова Визе по данным радиолокационной съемки

Ширяев М.А., Балдина Е.А.

Необходимость обновления картографической информации об арктическом регионе, быстро меняющемся в связи с изменениями климата, в сочетании с трудностями полевых обследований делает актуальным использование радиолокационных данных ДЗЗ. В работе использованы многовременные комплексные SLC (Single Look Complex) радиолокационные данные Sentinel-1 с фазовой компонентой в сочетании с оптическими снимками для картографирования природно-территориальных комплексов арктических районов на примере острова Визе. Обработанные материалы радиолокационной съемки – многовременные композиты с когерентностью (МТС – сочетание амплитуды двух радиолокационных снимков и когерентности их фаз) – позволили выделить ПТК острова на основе изменчивости этих параметров, отследить изменения береговой линии острова, а также определить участки с неоднозначным отнесением к тому или иному ПТК. Основным результатом работы является составленная карта острова Визе.

Ключевые слова: дешифрирование, *Sentinel-1,* многовременной композит с когерентностью, цветовой синтез, природно-территориальные комплексы

The demand for updated cartographic information about the Arctic region, rapidly changing due to climate change, combined with the difficulties of field surveys makes the use of remote sensing radar data relevant. We used multi-temporal complex SLC (Single Look Complex) radar Sentinel-1 data with phase component in combination with optical images for landscapes mapping of the Arctic regions on the example of Vise Island. The work was complicated by the shortage of field descriptions and maps for this territory. Multi-temporal composites with coherence (MTC – a combination of the amplitude of two radar images and the coherence of their phases) allow us to delineate landscapes of the island based on the variability of these parameters, trace changes in the island shoreline, as well as to identify areas with ambiguous assignment to one or another landscapes. The main result of the work is a map of Vise Island.

Keywords: image interpretation, Sentinel-1, multi-temporal coherence images, color synthesis, landscapes

Введение

Острова – это уникальные природные объекты на Земле, которые в силу своего положения наиболее чутко реагируют на изменения климата, тектонического режима, колебания уровня моря и другие процессы, происходящие как на глобальном, так и на локальном уровне [Булочникова, Романенко, 2010]. В частности, малые арктические острова ввиду своих природных особенностей могут служить маркерами процессов потепления климата. Знание их физико-географических характеристик позволит дать оценку динамики современных процессов и более точный прогноз. Сложность экологической ситуации на арктических территориях России обусловлена слабой восстановительной способностью природных компонентов на фоне постоянно растущего техногенного давления. Это ведет к необходимости обновления картографической информации о малых арктических островах и в частности – острова Визе, расположенного в Карском море. В условиях глобального изменения климата такие острова больше всех подвержены трансформациям. Полевые исследования на арктических островах крайне проблематичны

и ресурсозатратны вследствие их удаленности и сложности физико-географических условий. Так наиболее эффективным методом изучения северных территорий становится дистанционное зондирование, в частности с использованием радиолокационной аппаратуры [Вицентий, 2013].

В работе рассмотрена возможность использования многовременных данных на базе радиолокационных снимков, включающих как информацию об амплитуде принимаемого сигнала, так и когерентности фаз двух снимков – амплитудно-фазовых композитов *MTC*, в целях исследования свойств поверхностей арктического острова Визе по изображениям, а также картографирования природно-территориальных комплексов (ПТК) острова.

Исследуемая территория

Остров Визе (79º 30′ – 79º 40′ с. ш., 76 – 77º в. д.) расположен в северной части Карского моря. Он простирается с северо-запада на юго-восток на 35 км и имеет максимальную ширину 9 км. Его максимальная высота – 22 м, площадь (на 2022 год) – 231 км^2.

Рельеф острова Визе представляет собой пологоувалистую равнину миоцен-голоценового возраста морского генезиса с раннемеловым цоколем, с высотами до 22 м, сильно расчлененную густой термоэрозионной сетью, которая придает рельефу чисто эрозионный характер. Равнина ограничена термоабразионными обрывистыми берегами, а также морскими террасами высотой до 3 м, окаймляющими остров в большей части узкой полосой и обширным участком в восточной части острова. Аккумулятивные берега формируются в виде песчаных пляжей, песчаных и галечных кос и пересыпей [Дибнер, 1970; Романенко, 2008; Васильев и др., 2013].

Климат района – арктический морской, с низкой температурой воздуха, высокой влажностью и облачностью, малым количеством осадков, частыми туманами летом, штормами и метелями зимой [Васильев и др., 2013]. Средняя многолетняя температура воздуха равна –13,6 °С. Среднемесячная температура воздуха в самом теплом месяце, июле составляет +0,5 °С, в самом холодном, марте –26,9° С. В районе метеостанции в течение года выпадает 240 мм осадков. Устойчивый снежный покров образуется в середине сентября, окончательное его таяние происходит в конце июня. В холодные годы снежники лежат все лето [Северное УГМС]. Неправильные полусуточные приливы в районе о. Визе достигают величины 0,4 м. С ноября по май окружающая акватория покрыта льдами. Зимой вблизи побережий образуется припай. Максимальная толщина его достигает 1,5–2 м в мае [Васильев и др., 2013].

Остров Визе по геоботаническому районированию Арктики входит в область арктических полярных пустынь. Господствуют разнотравные лишайниковые полигональные тундры, широко распространена подушковидная форма роста цветковых растений. Покров в сообществах разреженный пятнистый – проективное покрытие 10–15 %, цветковых – 5–10 %, лишайников – 10–15 % [Сафронова, Ходачек, 1989].

Материалы и методы

В работе использованы различные материалы дистанционного зондирования: изображения с радиолокационных спутников *Sentinel-1,* снимки *Sentinel-2* (рисунок 1а), с привлечением дополнительных источников (глобальных ЦМР, мозаики снимков сверхвысокого разрешения *Esri World Imagery,* а также других найденных карт и описаний). Набор карт на эту территорию крайне беден, из тематических карт острова Визе доступны только мелкомасштабные с крайне скудной детальностью и сильным обобщением контуров [ГГК-1000, 2013; Атлас Арктики, 1985]. Карта с самым

крупным масштабом среди найденных на данную территорию – топографическая карта масштаба 1:200 000 (предположительно 1957 года) номенклатурой *T-43-IV, V, VI* (рисунок 1б) с сечением рельефа 20 м при максимальной абсолютной высоте 22 м и скудным отображением ситуации.

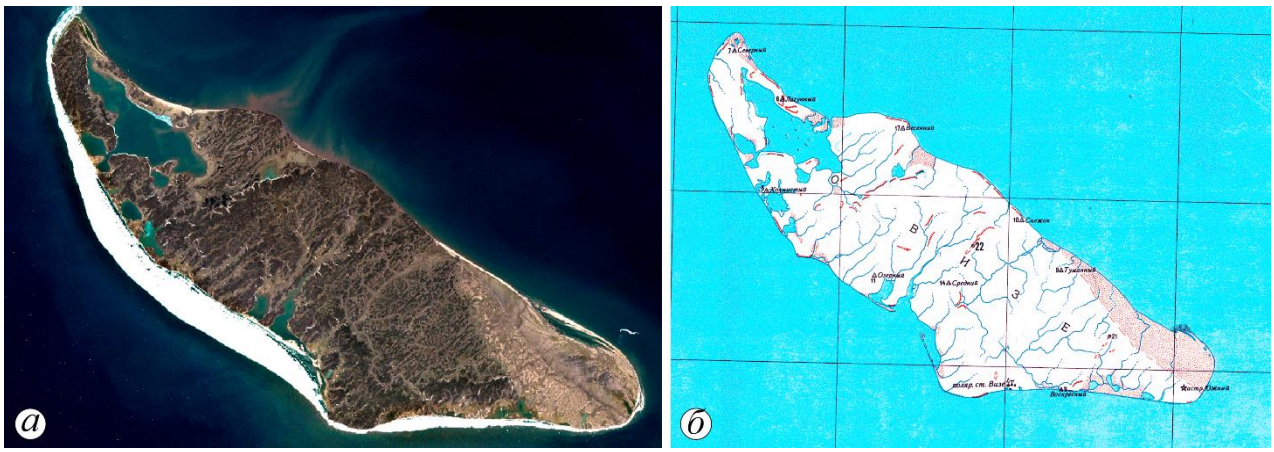


Рисунок 1 – остров Визе на снимке Sentinel-2 от 21.08.2019 (а) и на фрагменте топографической карты масштаба 1:200 000, номенклатура T-43-IV, V, VI (б)

На снимках *Sentinel-2*, а также на мозаике снимков сверхвысокого разрешения *ESRI World Imagery* легко выявить основные формы рельефа, так как их границы довольно четкие, однако провести ландшафтную дифференциацию острова трудно. Кроме того, в связи с особенностями климата (частой облачностью и коротким бесснежным периодом) и условиями освещения число доступных летних снимков в оптическом диапазоне крайне мало, в отличие от данных радиолокационной съемки.

Радиолокационные данные содержат в себе две характеристики радиоволны: ее амплитуду и фазу. Эти составляющие сигнала записываются в виде комплексного числа. В зависимости от задачи, например, для визуального дешифрирования, чаще достаточно только амплитудной информации – яркости изображения. Однако в некоторых направлениях исследований радиолокационные данные должны обязательно включать и амплитудную, и фазовую информацию, в частности, для задач интерферометрии. Сочетание этих двух составляющих радиосигнала в одном изображении обеспечивает принципиальный прирост информации по сравнению с использованием амплитудной и фазовой информации по отдельности.

Информативным видом амплитудно-фазового композита является многоканальный композит *MTC* (*Multi-Temporal Coherence*), разработанный компанией *e-GEOS* (Италия) [Пиетранера и др., 2012], который составляется следующим образом: в красном канале берется амплитуда первого по дате радиолокационного снимка; в зеленом – амплитуда второго по дате радиолокационного снимка, сделанного с теми же параметрами съемки, что и первый снимок, а в синем – когерентность фаз этих двух радарных снимков. Когерентность традиционно используется для оценки перспективы интерферометрической обработки изображений. Если значение когерентности близко к единице, то это говорит о стабильности интерферометрической фазы и отсутствии изменений местности между съемками, в то время как низкая ее величина – о разрушении фазы регистрируемых сигналов [Захаров и др., 2012; Чимитдоржиев и др., 2020]. Максимальная информативность такого композита достигается при коротких временных промежутках между съемками (несколько суток). Для

двух снимков одного из аппаратов (*Sentinel-1A* или *-1B*) минимальная временная база, обеспечивающая одинаковую геометрию съемки, составляет 12 суток, исходя из орбитального построения космической группировки [Ширшова, Балдина, 2021]. Такие композиты с короткой временной базой могут использоваться для задач тематического картографирования с опорой на цвет изображения, зависящий от трех перечисленных характеристик, что позволяет дифференцировать поверхности в зависимости от их отражательных свойств и их изменчивости.

Для исследования свойств поверхности о. Визе и его картографирования были использованы комплексные *SLC* (*Single Look Complex*) радиолокационные данные *C*-диапазона со спутника *Sentinel-1B*. Для дешифрирования были подготовлены 37 композитов с *HH*-поляризацией на бесснежные сезоны с 2016 по 2021 годы. Обработка выполнялась в программном обеспечении *SNAP* [Ширшова, Балдина, 2021].

Основным методом обработки *MTC*-композитов стало визуальное дешифрирование с опорой на цвет с привлечением всех доступных дополнительных источников информации. Дополнительно для дешифрирования и создания карты использовались производные изображения на основе снимков *Sentinel-2* (индексные изображения, растры значений проективного покрытия растительного покрова *FVC*, рассчитанный в ПО *SNAP* с помощью модуля *Biophysical Processor*), цифровая модель местности *ArcticDEM* с разрешением 2 м и производный от нее растр крутизны склонов, другие доступные картографические произведения, литературные источники о геологии, рельефе, растительности острова Визе, а также фотографии и видеозаписи, найденные в сети Интернет, и предоставленные Ф. А. Романенко снимки местности (сделанные М. В. Гаврило).

Результаты

Изображение острова Визе на многовременных композитах с когерентностью, составленных из летних съемок, в целом, идентичны, а основные изменения поверхности, проявляющиеся в различиях цвета отдельных участков, связаны с изменением увлажнения (особенно в межсезонье) и с развитием в некоторых местах растительного покрова (рисунок 2).

На многовременных композитах, составленных из летних снимков, белый или близкий к белому цвет имеют участки, характеризующиеся выраженной шероховатостью, отчего имеют высокие значения яркости в оба срока, и практически не подвергающиеся изменениям за 12 суток, которые соответствуют денудационным равнинам с полигональным микрорельефом и разреженной растительностью.

На некоторых из композитных изображений можно встретить многочисленные участки желтого цвета (высокий уровень отклика сигнала в обе даты, низкая когерентность), приуроченные к склонам и междуречным участкам с сильным расчленением рельефа (рисунок 3). Особенно выделяются междуречные участки в районе юго-западного побережья острова, где желтый цвет сохраняется на большинстве многовременных композитов. Эти пиксели, судя по оптическим снимкам, соответствуют самым возвышенным (до 22 м) участкам денудационной равнины с очень выраженным криогенным микрорельефом, крупными трещинами. Такие ландшафты занимают небольшие площади и на материалах съемки в видимом диапазоне, в частности, на мозаике сверхвысокого разрешения *Esri World Imagery*, обнаруживаются довольно тяжело. А снимках более низкого разрешения, *Sentinel-2*, не различаются совсем, в отличие от многовременных композитов из снимков *Sentinel-1B* с близким пространственным разрешением.

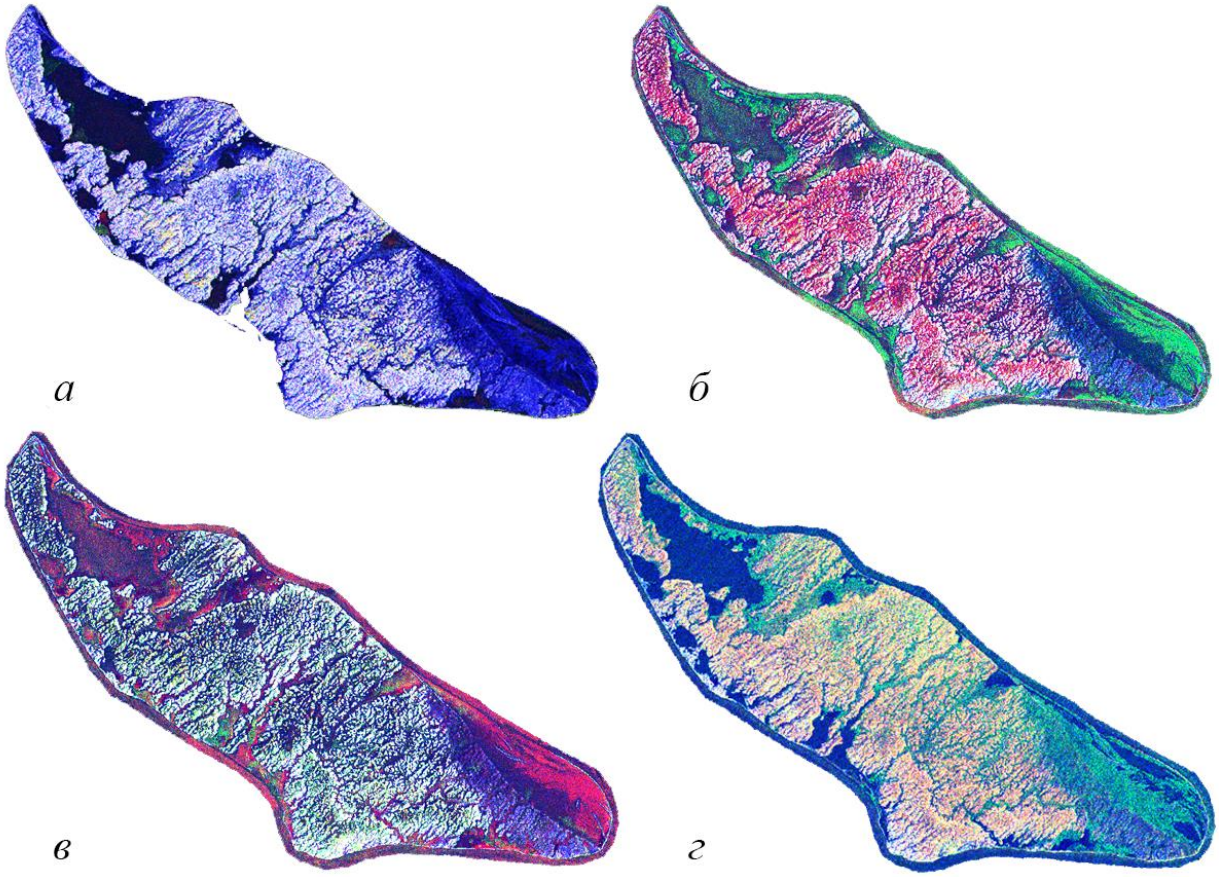


Рисунок 2 – композиты МТС, составленные по многовременным радиолокационным снимкам Sentinel-1 с HH-поляризацией: а – 09.08.2021 и 21.08.2021; б – 03.06.2020 и 15.06.2020; в – 15.06.2020 и 27.06.2020; г – 19.09.2020 и 01.10.2020

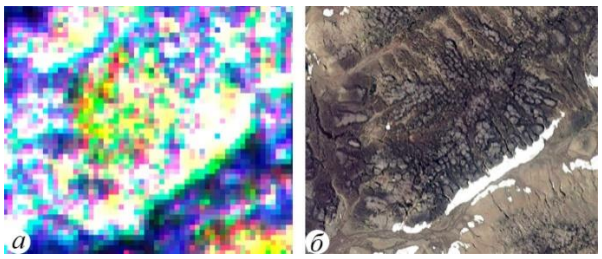


Рисунок 3 – участки денудационной равнины с сильно выраженным полигональным рельефом на композите МТС (09–21.08.2021) (а) и на Esri World Imagery (б)

Участки желтого цвета также встречаются на центральном участке равнины и напротив, соответствуют площадкам с невыраженным криогенным полигональным рельефом (рисунок 4): редкими трещинами и нерегулярными полигонами. Вероятно, в данном случае влияние на когерентность оказывает растительный покров, что подтверждается анализом индексных изображений (*FVC*), полученных по снимкам *Sentinel-2*.

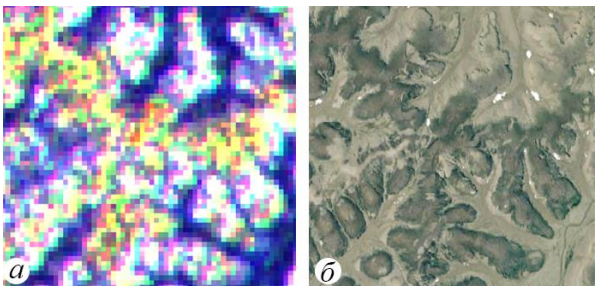


Рисунок 4 – площадки с невыраженным полигональным рельефом (желтые) и термоэрозионные овраги (синие) на композите МТС (09–21.08.2021) (а) и на ESRI World Imagery (б)

Днища оврагов на большинстве многовременных композитов изображены синим и темно-синим цветом (рисунок 4), так как они представляют собой плоские понижения, лишенные растительного покрова, с переувлажненными грунтами.

Склоны изображены теми же цветами и

сливаются с днищами ложбин, что не позволяет их отделять по многовременным композитам. Широкие темно-синие, красные и зеленые участки также можно встретить и на междуречье. Часть из них соответствуют увлажненным поверхностям без растительности – мелким оврагам.

Также в центральной части острова есть крупная заболоченная котловина с полигональным рельефом и болотной растительностью, регулярно затапливаемая талыми водами – на композитах она изображена либо в темно-синих тонах (рисунок 5), либо сильно зашумленной в период затопления.

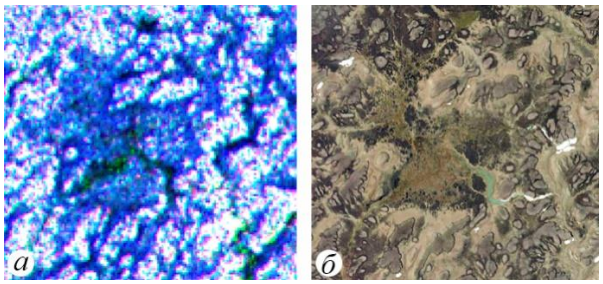


Рисунок 5 – переувлажненная котловина в пределах равнины на композите МТС (09–21.08.2021) (а) и на Esri World Imagery (б)

Современные морские террасы на многовременных композитах изображены синим и темно-синим цветом (низкие значения яркости на обе даты, высокая когерентность) (рисунок 6). Такой низкий отклик сигнала объясняется низкой диэлектрической проницаемостью грунта (в полевых описаниях – песка), в том числе по сравнению с водой (4 и 88 единиц у песка и у воды соответственно), а также почти зеркальным отражением сигнала, так как песчаные поверхности морской террасы ровные. Эти песчаные поверхности хорошо отделяются от открытой водной поверхности с волнением и рябью, текстура которых на разных изображениях характеризуется высокой степенью зашумленности и низкой когерентностью, что позволяет уверенно провести границу низкой воды по серии многовременных композитов.

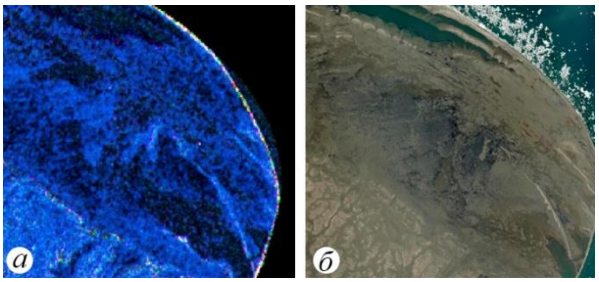


Рисунок 6 – участок современной морской террасы (в центре) на востоке острова на композите МТС (09–21.08.2021) (а) и на Esri World Imagery (б)

Во многих местах на многовременных композитах вдоль береговой линии можно встретить вытянутые узкие полосы с высоким откликом сигнала и высокой когерентностью, сохраняющиеся почти на всех изображениях (рисунок 7). Это либо валунно-галечные гряды, которым на ЦМР соответствуют небольшие возвышения рельефа, либо галечные пляжи и косы.

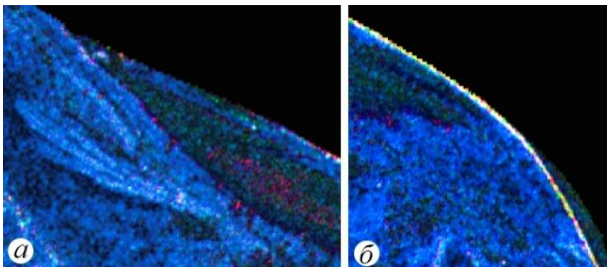


Рисунок 7 – валунно-галечные гряды (а) и галечные пляжи (б) на композите МТС (09–21.08.2021)

Кроме того, на некоторых изображениях сезонные изменения значений амплитуды и когерентности позволяют провести границу затапливаемых участков террасы и осушек – они имеют красные (высокие значения яркости в первый срок и низкие во второй) либо зеленые (низкие значения яркости в первый срок и высокие во второй) цвета при изменении уровня воды (рисунок 8). Стоит отметить, что влияние приливов на уровень воды крайне мало [Васильев и др., 2013], а наибольшее влияние оказывают нагоны и сток талых вод, и характер изображений подтверждает этот факт.

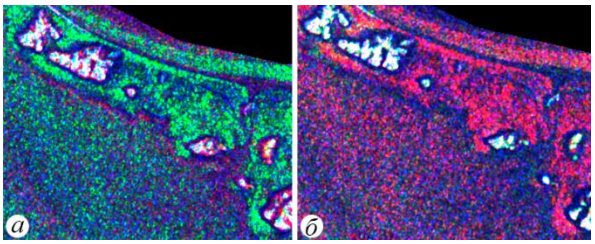


Рисунок 8 – участок осушки (зеленого и красного цвета) на композитах МТС в период снеготаяния (03–15.06.2020) (а), (15–27.06.2020) (б)

Отражательные и диэлектрические свойства песка проявляются и на возвышенном участке в восточной части острова, расчлененной оврагами и без признаков растительности, однако в некоторых местах встречаются отдельные небольшие участки с высоким откликом сигнала (рисунок 9). В ландшафтной структуре граница представляет собой почти прямую линию, однако на ЦМР граница между денудационной равниной и песчаной поверхностью никак не выражена, и, можно предположить, что данные структуры испытали тектоническое поднятие одновременно. Другой фактор – рисунок гидросети: долины вытянуты по направлению на юго-запад, а их уклон по ЦМР обращен к южному побережью. Кроме того, аналогичный крупный участок был найден на южном побережье острова, а более мелкие – в глубине острова. Все это позволяет предположить, что эти площадки – обнажения цоколя отложений нижнего отдела мелового периода [ГГК-1000, 2013].

Таким образом, обработанные материалы радиолокационной съемки помогли лучше определить ландшафтные градации острова, отследить изменения береговой линии острова, а также определить участки с неоднозначным отнесением к тому или иному типу.

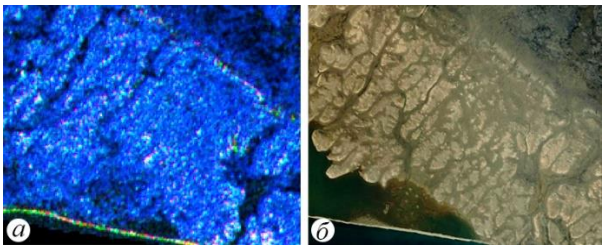


Рисунок 9 – участки равнины без растительности на композите МТС (09–21.08.2021) (а) и на Esri World Imagery (б)

Результатом дешифрирования МТС-композитов стала карта острова Визе, которая содержит в себе информацию об основных природно-территориальных комплексах острова.

Принцип построения наименований ПТК основан на иерархическом принципе и включает в себя следующие компоненты:

- Геоморфологическая составляющая – форма рельефа, генетическая классификация, возраст рельефа и слагающие породы;
- Ландшафтная составляющая – характер поверхности и растительность.

Нанесение контуров началось с границ острова по уровню малой воды с использованием разновременных снимков оптическом и радиодиапазоне. Наполнение тематического содержания (слоя контуров природно-территориальных комплексов) началось с нанесения контуров днищ песчаных долин, ввиду их сложного рисунка, по *МТС*-композитам и снимкам в оптическом диапазоне с привлечением растра уклонов. Далее на полученный «каркас» отрисованных контуров днищ долин «насаживались» контура склонов, которые наносились по изображению уклонов, а границы бровок корректировались по снимкам в видимом диапазоне и *МТС*-композитам. Градация склонов по крутизне проводилась по значениям на растре уклонов. Остальные формы рельефа наносились в последнюю очередь. Контура равнин дробились в зависимости от характера рисунка мерзлотного рельефа

(по мере увеличения ее выраженности), высоте, условий увлажнения и проективного покрытия растительности (либо отсутствия таковой), и производилось по материалам радиолокационной (по ним находились выделяющиеся контура) и оптической (по ним определялся рисунок местности) съемок. Контура морских террас и аккумулятивных берегов разделялись в зависимости от характера поверхности и затапливаемости приливами и нагонами, что определялось по материалам радиолокационной съемки. Обрывы были отрисованы по растру уклонов и мозаике высокого разрешения *Esri World Imagery*, водотоки – по снимкам *Sentinel-2*, а также по топографической карте.

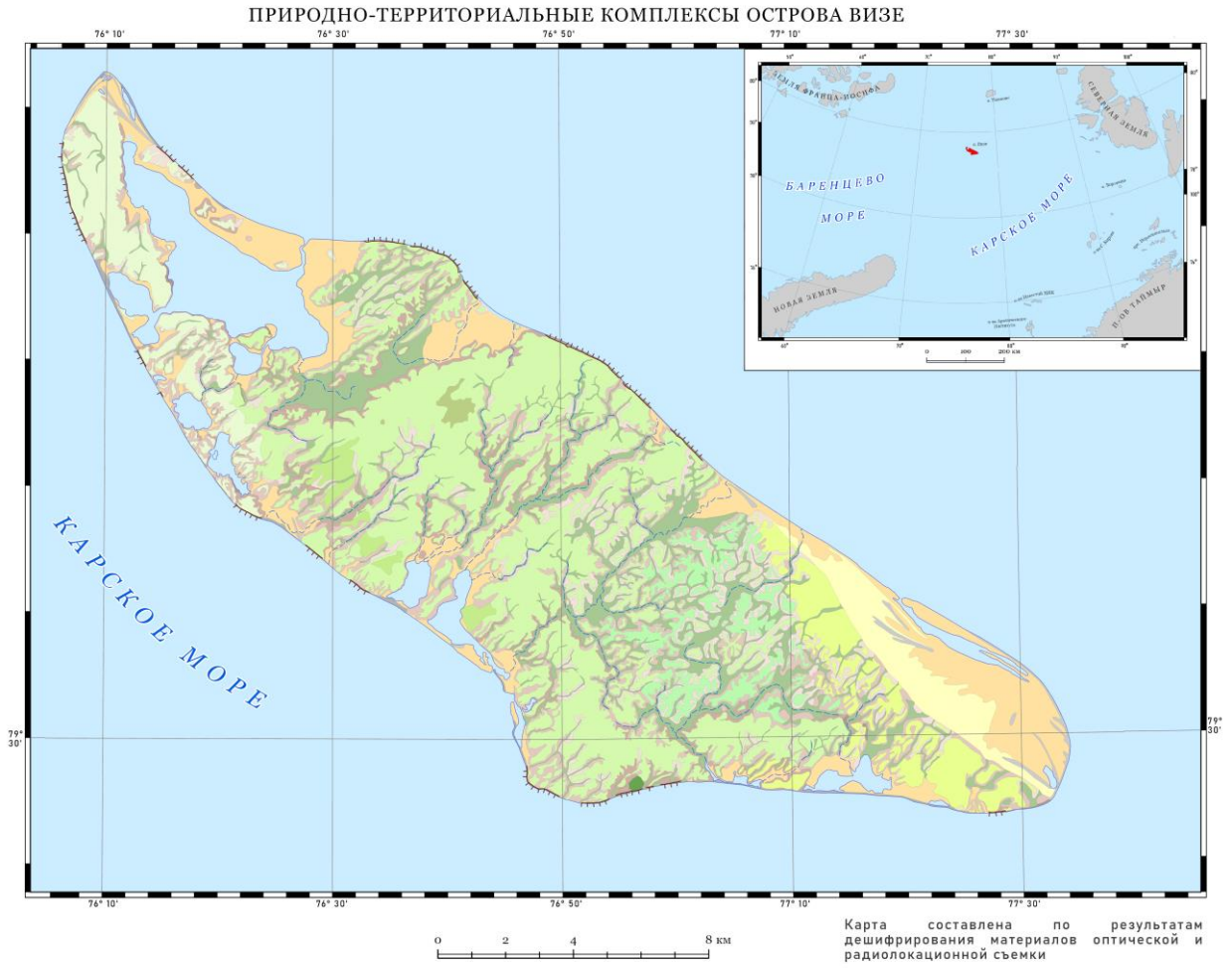


Рисунок 10 – Итоговая карта природно-территориальных комплексов острова Визе

В результате проведенных работ на базе комплексного анализа многовременных композитов с когерентностью и привлечения различных дополнительных источников составлена карта (рисунок 10, 11), которая демонстрирует природно-территориальные комплексы острова Визе. На ней хорошо прослеживается ландшафтная неоднородность острова, различается неравномерность горизонтального расчленения острова (в том числе в зависимости от абсолютных высот). Итоговая карта позволяет передать ландшафтный облик острова.

Формы рельефа	ПТК		Цвет* участков на многовременных композитах с когерентностью за 12-дневный период	
ПОЛОГОУВАЛИСТЫЕ ПЛАСТОВЫЕ ЭРОЗИОННО-ДЕНУДАЦИОННЫЕ РАВНИНЫ С РАННЕМЕЛОВЫМ ЦОКОЛЕМ И МАЛОМОЩНЫМ ЧЕХЛОМ РЫХЛЫХ ОТЛОЖЕНИЙ (ПЕСКОВ, ПЕСЧАННИКОВ И АЛЕВРИТОВ)	Равнины с выраженным криогенным полигональным микрорельефом и пятнистой с общим проективным покрытием до 5-7%, приуроченной преимущественно к трещинам усыхания, мохово-лишайниковой с участием подушечных форм разнотравья растительностью арктических пустынь	высотой 12-20 м	Белый - неровные участки с шероховатым отражением сигнала, не подвергаются изменениям в теплое время года	
		высотой 6-12 м		
	Равнины высотой 12-20 м со слабовыраженным криогенным полигональным микрорельефом и пятнистой с общим проективным покрытием до 10-12%, приуроченной преимущественно к трещинам усыхания, мохово-лишайниковой с участием подушечных форм разнотравья растительностью арктических пустынь		Белый - неровные участки с шероховатым отражением сигнала, не подвергаются изменениям в теплое время года Желтый - сильное влияние растительности в период активной вегетации	
	Равнины высотой 12-22 м с сильновыраженным криогенным полигональным микрорельефом и пятнистой с общим проективным покрытием до 3%, приуроченной преимущественно к трещинам усыхания, мохово-лишайниковой с участием подушечных форм разнотравья растительностью арктических пустынь		Желтый - сильная расчлененность рельефа	
	Участок равнины высотой 12-14 м антропогенно преобразованный с общим проективным покрытием до 20%, мохово-лишайниковой с участием подушечных форм разнотравья растительностью арктических пустынь		Желтый - сильное влияние растительности в период активной	
	Заболоченные котловины в пределах равнины с криогенным полигональным микрорельефом и мохово-лишайниковой растительностью арктических пустынь		Синий - плоские участки Черный - переувлажнение	
	Участки равнины с обнажением раннемелового цоколя высотой 12-20 м с невыраженным проявлением криогенных процессов без растительности		Синий, голубой - плоские или слегка неровные участки, изменениям за теплый период не подвергаются	
СКЛОНЫ ДЕЛЮВИАЛЬНЫЕ, СОЛИФЛЮКЦИОННЫЕ И ТЕРМОЭРОЗИОННЫЕ	Склоны делювиальные, солифлюкционные термоэрозионные с очень густым расчленением промоинами без растительности	крутые и очень крутые (15° и более)	Желтый - сильная расчлененность рельефа Черный - переувлажнение	
		средней крутизны (8-15°)		
		пологие (4-8°)		
		очень пологие (2-4°)		
		обрывы		
ДНИЩА ОВРАГОВ И ЛОЖБИН СТОКА ТАЛЫХ ВОД	Песчаные днища оврагов и ложбин стока талых вод с отдельными сообществами мохово-лишайниковой растительности		Синий - плоские участки Черный - переувлажнение Красный/зеленый - изменение степени увлажнения	
СОВРЕМЕННАЯ МОРСКАЯ ТЕРРАСА	Участки современной морской террасы с эоловым микрорельефом, не подверженные затоплению приливами и нагонами без растительности		Синий - плоские участки Черный зашумленный - переувлажнение Красный/зеленый - изменение степени увлажнения	
НИЗМЕННЫЕ РАВНИНЫ И АККУМУЛЯТИВНЫЕ БЕРЕГА	Приливные песчаные осушки и прибрежные и прилагунные песчаные низменные равнины, затапливаемые высокими приливами и нагонами (лайды) без растительности		Черный зашумленный - плоские переувлажненные участки Красный/зеленый - изменение степени увлажнения	
	Галечные и валунно-галечные пляжи		Белый - неровные участки с шероховатым отражением сигнала, не подвергаются изменениям в теплое время года	
	Валунно-галечные гряды		Белый - неровные участки с шероховатым отражением сигнала, не подвергаются изменениям в теплое время года	

*Пояснения к основным цветам на мультивременных композитах с когерентностью:

Белый - высокие значения амплитуды (яркости) на первом и втором снимках, высокая когерентность

Синий - низкие значения амплитуды (яркости) на первом и втором снимках, высокая когерентность

Желтый - высокие значения амплитуды (яркости) на первом и втором снимках, низкая когерентность

Черный - низкие значения амплитуды (яркости) на первом и втором снимках, низкая когерентность

Красный - высокие значения амплитуды (яркости) на первом снимке и низкие на втором, низкая когерентность

Зеленый - низкие значения амплитуды (яркости) на первом снимке и высокие на втором, низкая когерентность

Рисунок 11 – Легенда к карте природно-территориальных комплексов острова Визе

Заключение

Картографирование труднодоступных слабоизученных арктических островов требует привлечения разнородных данных. Особенно ценным источником, кроме полевых описаний, являются материалы радиолокационной съемки благодаря гарантированному получению снимков независимо от облачности, солнечного освещения и высокой периодичности. Помимо всепогодности и независимости от условий освещения, важным преимуществом стало наличие фазовой составляющей снимка и возможности

расчета по ней когерентности, в результате чего удалось выявить характер изменения свойств поверхности во времени, что помогло при дешифрировании. Однако сложность однозначной интерпретации одних только радиолокационных изображений требует привлечения разнообразных дополнительных источников, таких как космических снимков в оптическом диапазоне и глобальных ЦМР. На основе использованных материалов и разработанного подхода анализа многовременных композитов была составлена карта природно-территориальных комплексов острова Визе, характеризующая особенности рельефа, ландшафтного рисунка и растительности этой территории.

Выражаем благодарность к.г.н Ф. А. Романенко, в.н.с. кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета и к.г-м.н. Е. И. Пижанковой, с.н.с геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, за консультации и ценные сведения об исследуемой территории, а также за рекомендации по разработке легенды карты, а также аспирантку кафедры картографии и геоинформатики В. Ю. Ширшовой за помощь в создании *MTC*-композитов.

Список литературы

Атлас Арктики / М.: Главное Управление геодезии и картографии при СМ СССР, 1985. – 204 с.

Булочникова А.С., Романенко Ф.А. Особенности рельефа малых островов Арктических и Дальневосточных морей // Природа шельфов и архипелагов Европейской Арктики. Вып. 10, М.: ГЕОС, 2010. – с. 25–30.

Васильев В.В., Вискунова К.Г., Кийко О.А., Козлов С.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист Т-41–44 – мыс Желания. Объяснительная записка. − СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. – 200 с.

Вицентий А.В. Применение дистанционного зондирования земли и космических технологий для развития арктических и субарктических территорий Российской Федерации // Труды Кольского научного центра РАН, №5 (18), 2013. – с. 40–45.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист Т. 41–44 – мыс Желания. Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013.

Дибнер В.Д. Геоморфология островов и морского дна советского сектора Северного Ледовитого океана // Геология СССР. Т. 26. М.: Недра, 1970 – с. 405–431.

Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности / М.: Красанд, 2012. – 248 с.

Пиетранера, Ф. Бритти, Л. Чезарано и др. Новый продукт МТС, рассчитываемый по данным COSMO-SkyMed // Геоматика, Совзонд. – 2012. – №1(14). – с. 46–51.

Романенко Ф.А. Интенсивность геоморфологических процессов на островах и побережьях морей Карского и Лаптевых (по материалам наблюдений полярных станций) // Геоморфология. – 2008. – № 1. – с. 56–64.

Сафронова И.Н., Ходачек Е. А. О флоре и растительности островов Андрея, Уединения и Визе (Северный Ледовитый океан) // Ботанический журнал. – 1989. – т. 74. – №7. – с. 1003–1011.

Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Технология совместного анализа

временных рядов изображений интерферометрической когерентности Sentinel-1 и вегетационного индекса по данным Sentinel-2 для мониторинга сельскохозяйственных полей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – №4. – с. 61–72.

Ширшова В.Ю., Балдина Е.А. Применение мультивременного композита с когерентностью (МТС) для изучения сезонной изменчивости поверхности о. Визе в целях его картографирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – №4. – с. 79–91.

ФГБУ «Северное УГМС». «Остров Визе. О полярных и арктических станциях» [Электронный ресурс] URL: http://sevmeteo.polarpost.ru/articles/18/76.shtml.html (дата обращения 24.10.2021).

Сведения об авторах

Михаил Андреевич Ширяев – студент 4 курса бакалавриата кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Елена Александровна Балдина – ведущий научный сотрудник кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук.