

РЕКОНСТРУКЦИИ ИСТОРИИ ОБЩЕСТВА И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ИСТОРИЧЕСКИХ КАРТ И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ: ОБЪЕКТЫ, ИНСТРУМЕНТАРИЙ, КЕЙСЫ

Д.С. Жуков, доц. ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет
им. Г.Р. Державина», канд. ист. наук, ineternatum@mail.ru

Ю.И. Мовчко, инж.-прогр. ФГБОУ ВО «Тамбовского государственного университета
им. Г.Р. Державина», apvn2008@mail.ru

Рецензент: А.В. Баранов, д-р полит. наук, д-р истор. наук, проф. ФГБОУ ВО
«Кубанский государственный университет», baranovandrew@mail.ru

В статье представлен обзор новейших работ, в которых данные дистанционного зондирования земли (аэро- и космические снимки) сопрягаются с историческими картами для реконструкции изменений землепользования и почвенно-растительного покрова (land use and land cover, LULC) в связке с социальными трансформациями. Особое внимание уделено ряду зарубежных исследований, в которых динамика LULC трактуется совместно с масштабными демографическими трансформациями и скоротечной урбанизацией. Авторы рассматривают наиболее распространенный исследовательский дизайн в рамках обозначенного подхода. Представлены стандартные и перспективные методы и инструменты.

Ключевые слова: дистанционное зондирование земли, землепользование и почвенно-растительный покров, исторические карты, геоинформационные системы, социальная история, историческая география, история ландшафта.

RECONSTRUCTION OF THE HISTORY OF SOCIETY AND THE NATURAL ENVIRONMENT BASED ON HISTORICAL MAPS AND REMOTE SENSING DATA: OBJECTS, TOOLS, AND CASES

D.S. Zhukov, Docent, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Doctor of
History, ineternatum@mail.ru

Yu.I. Movchko, Software Engineer, Tambov State University named after G.R. Derzhavin,
apvn2008@mail.ru

This article presents an overview of recent work in which remote sensing data (aerial and satellite images) are combined with historical maps to reconstruct land use and land cover (LULC) changes in relation to social transformations. Particular attention is paid to a number of foreign studies in which the dynamics of LULC are interpreted in conjunction with large-scale demographic transformations and rapid urbanization. The authors examine the most common research designs within the framework of this approach. Standard and promising methods and tools are presented.

Keywords: remote sensing of the earth, land use and soil and vegetation cover, historical maps, geoinformation systems, social history, historical geography, landscape history.

Введение

Социальная история (как далекого прошлого, так и наших дней) неизменно совершается во взаимосвязи с изменениями природной среды. Среди таковых изменений наиболее показательными — доступными для изучения и значимыми для общества — являются метаморфозы землепользования и почвенно-растительного покрова (land use and land cover, LULC).

Бурное развитие социально-исторических изысканий в течение последних десятилетий инициировало потребность в исторических реконструкциях LULC. Под влиянием практических запросов таковые реконструкции, как правило, имеют финальной точкой современное состояние LULC. Подобный подход позволяет проследить генезис наличной среды и понять закономерности взаимодействия общества и природы в изучаемых регионах. Это необходимо для выработки рекомендаций для сбалансированного развития (например, для прогнозирования динамики расселения или последствий тех или иных вмешательств в природную среду). В связи с большим объемом информации, вовлекаемой в подобного рода проекты, они обычно сфокусированы на небольших территориях — микрорегионах, однако охватывают довольно длительные исторические периоды — столетие и более.

Рассматриваемый исследовательский подход опирается на два ключевых типа источников: исторические карты и современные данные дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), в частности — на аэро- и спутниковые снимки (в некоторых случаях исследователи используют ортофотоплан).

Сопоставление исторических карт между собой и с ортофотопланами — нетривиальная задача. Однако ее решение обычно демонстрирует высокую эвристическую продуктивность. Исследователи получают возможность увидеть как менялся облик земли (включая нетронутые человеком ландшафты, селитебные территории и иные классы LULC). Это позволяет понять, каковы были движущие силы таковых изменений: какие факторы воздействовали и продолжают воздействовать на социальную жизнь.

«Данные о почвенно-растительном покрове, — пишут американские исследователи Дж. Дорнберер и коллеги, — отражают антропогенное воздействие на физический ландшафт и тем самым представляют собой уникальную точку соприкосновения между физическими системами (например, гидрологическими, биогеохимическими, экологическими) и поведением человека. Последствия политических решений, управления земельными ресурсами и использования энергии выражаются в количественных показателях, влияющих на ландшафт. Чтобы понять, как меняется ландшафт, и как это влияет на человека и природные системы, необходимо изучить историю изменения почвенно-растительного покрова, а также соответствующие данные о последствиях этих изменений. Аналогичным образом, для облегчения планирования ландшафтных изменений и потенциального смягчения негативных последствий необходимы сценарии будущих изменений ландшафта» [1].

Наше исследование представляет собой аналитический обзор литературы, в которой данные ДЗЗ сопрягаются с историческими картами для реконструкции изменений LULC в связке с социальными трансформациями. Предшествующий подобный обзор предпринят коллегами (включая одного из авторов этой статьи) в 2019 году [2]. Поэтому в данную статью включены работы, вышедшие за последние шесть лет, а также некоторые более ранние публикации, не упомянутые в предшествовавшем обзоре.

Задачи нашей работы сводятся к тому, чтобы извлечь из литературных источников ответы на некоторые принципиальные источниковедческие и методологические вопросы:

1. Какого рода результат (приращение предметного знания) авторы получают из сопоставления исторических карт и данных ДЗЗ?
2. Каков наиболее часто используемый исследовательский дизайн научных проектов, предпринятых в рамках данного направления (каковы, в частности, этапы работ, хронологические и географические рамки)?
3. Какие методы и инструменты привлекаются на каждом этапе?
4. Насколько рассматриваемый подход продуктивен для изучения движущих сил социальной истории и метаморфоз LULC?
5. Какие содержательные результаты и интерпретации рассмотренных исследований можно использовать в качестве компаративного материала для аналогичных российских исследований?

Последняя задача подтолкнула нас особое внимание уделить ряду работ, в которых изменения LULC трактуются в связке с масштабными демографическими изменениями и скоротечной урбанизацией (которые, как известно, оказали заметное и, возможно, решающее влияние на социальные и природные ландшафты России в течение прошедших двух столетий). Этот обзор включает несколько кейсов (первый раздел), которые представляют собой детальное изложение четырех работ, которые, на наш взгляд, репрезентативно отразили наиболее популярные или наиболее перспективные варианты исследовательского дизайна в изучаемой области. Раздел «Методология» представляет несколько работ с фокусом на исследовательский инструментарий. Последний раздел — «Тематики» — показывает, какие предметы и с какими задачами изучались в рассматриваемой области. Конечно, последний раздел не претендует на полноту освещения предметного пространства, однако показывает широту и возможности работ, сочетающих исторические карты с данными ДЗЗ.

Кейсы

Турецкие исследователи П. Эттехади Осгуи и ее коллеги [3] провели кросс-темпоральный и кросс-региональный анализ исторических изменений в землепользовании и почвенно-растительном покрове в двух микрорегионах Турции (Аксу и Кестель) на трех временных срезах. Источниками геопространственных данных для этого проекта были исторические кадастровые карты, созданные в 1858 году генштабом Османской империи, монохромные аэрофотоснимки за 1955 год, сделанные фотоэскадрилей ВМС США, и многоспектральные спутниковые снимки высокого разрешения WorldView-3 (WV-3) 2020 года. Исследователи стремились не только зафиксировать количественную динамику площади, занимаемой разными классами LULC, но и выявить движущие силы, вызвавшие эти изменения.

Несмотря на то, что рассматриваемые микрорегионы были небольшими, авторы поставили перед собой задачу свести к минимуму объем ручной работы для определения границ классов земель. Сложность данного исследования, как и любой подобной работы, заключалась в необходимости сопоставить разные по характеру источники (свести их в рамках одной геоинформационной системы (ГИС), привязав к координатам и максимально исправив искажения. Только так можно было достичь пространственного согласования различных геопространственных данных. Кроме того, авторы вынуждены были решать проблему интерпретации изображений и классификации земель (см. рис. 1).

Для привязки исторических карт и аэрофотоснимков к координатам эти изображения были разбиты на ячейки. Для каждой ячейки была произведена «трансформация методом сплайна (методом «резинового листа»», который подходит для достижения локальной точности [геопривязки раstra] и требует наличия как минимум 10 контрольных точек. Сплайн-преобразование обеспечивает высочайшую точность геометрической коррекции исторических геопространственных данных» [3].

Погрешности в исторических кадастровых картах и присущие аэрофотоснимкам искажения, связанные с рельефом и наклоном камеры, затрудняют точную привязку. Это потребовало увеличения числа наземных контрольных точек (ground control points — GCPs). Это точки, которые фиксируются на исследуемом изображении, и истинные координаты которых известны. Для качественной привязки необходимо не только значительное число таких точек, но и оптимальное их расположение. «Лучшими местами для GCP были пересечения границ сельскохозяйственных полей и дорог. Что касается искусственных объектов, то места поклонения и школы, которые, скорее всего, остались неизменными, являются другими оптимальными местами для GCP, позволяющими выполнить точную геометрическую коррекцию» [3].

Следующая проблема, которая должна была быть решена в рамках принятого классического исследовательского дизайна, — выбор классификации LULC. Используемые классы должны быть, во-первых, эвристически продуктивными для понимания процессов на изучаемых территориях и, во-вторых, быть пригодными для кросс-темпорального исследова-

ния (это должны быть классы, которые можно выделить не только на аэро- и спутниковых снимках, но и на исторических картах). Между тем, классификация землепользования и почвенно-растительного покрова на исторических картах определяется их легендой. Категории земель, описываемые легендой, должны быть сопоставлены (и, по возможности, отождествлены) с современными классами LULC. «Мы определили нашу схему классификации, – пишут турецкие исследователи, – проанализировав классы земель, используемые в сельском хозяйстве, которые были выделены во всех трех наборах данных (то есть на кадастровых картах, аэрофотоснимках и снимках WV-3). Мы также приводим коды и названия классов почвенно-растительного покрова, взятые из номенклатуры CORINE». Классификация CORINE (классификация, разработанная в рамках европейской программы Coordination of Information on the Environment) довольно часто используется для описания современных и исторических классов землепользования и почвенно-растительного покрова и была рассмотрена в предшествующем обзоре литературы [2].

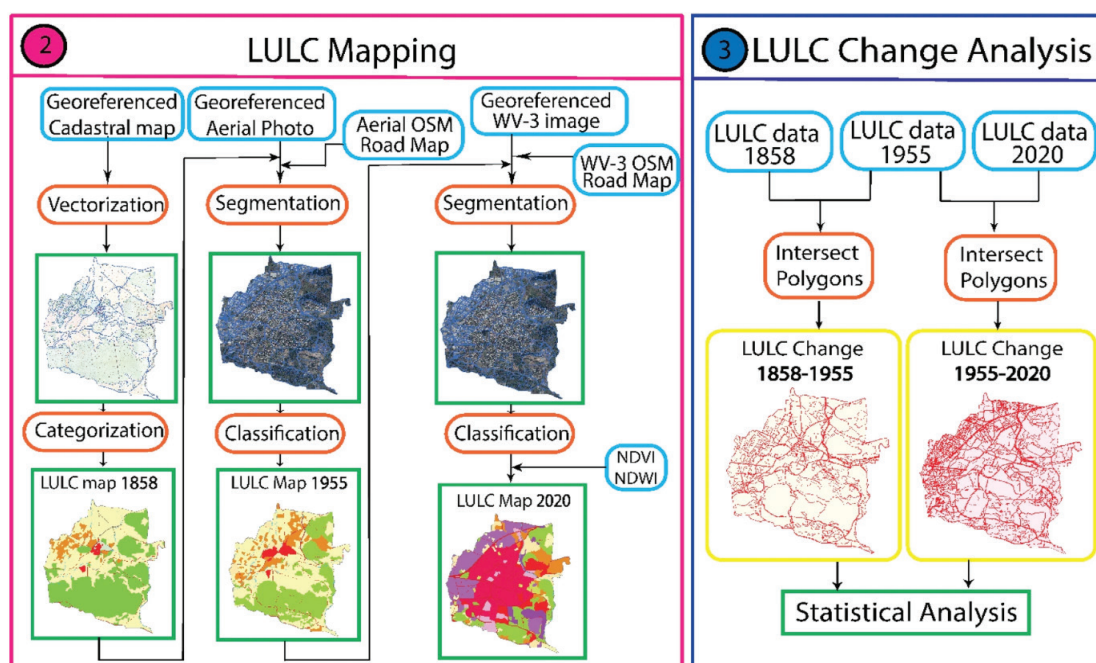


Рис. 1. Блок-схема второго и третьего этапов обработки данных для анализа изменений LULC в районе Кестель (фрагмент)

Источник изображения: [3]

На следующем этапе составления карты LULC исследователи выполнили векторизацию исторической карты и идентификацию полученных полигонов в соответствии с выбранной ранее классификацией земель. «Сегментация и классификация аэрофотоснимков выполнена с использованием объектно-ориентированного подхода The object-based image analysis (OBIA), при составлении карты LULC имеет преимущества перед традиционными попиксельными методами. Было использовано программное обеспечение eCognition® (Trimble Germany GmbH, Мюнхен) для реализации объектно-ориентированного анализа изображений (OBIA)» [3].

В этой точке исследования, таким образом, были получены сопоставимые (геопривязанные) карты LULC для Аксу и Кестеля за 1858, 1955 и 2020 годы. Векторные данные этих карт

были использованы для количественной оценки изменений LULC в течение двух хронологических отрезков с 1858 по 1955 год и с 1955 по 2020 год. Рис. 2 и 3 демонстрируют исходные данные и пригодные для количественной оценки результирующие данные (карты LULC).

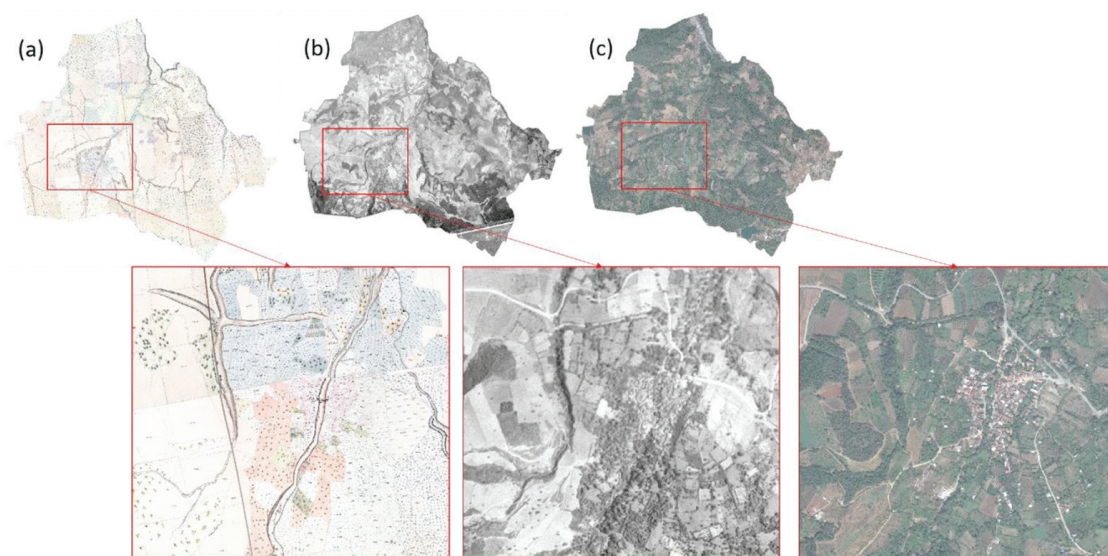


Рис. 2. Набор геопространственных данных для исследуемого региона Аксу (а) Кадастровая карта 1858 года, (b) аэрофотоснимок 1955 года и (c) спутниковый снимок WV-3 2020 года
Источник изображения: [3]

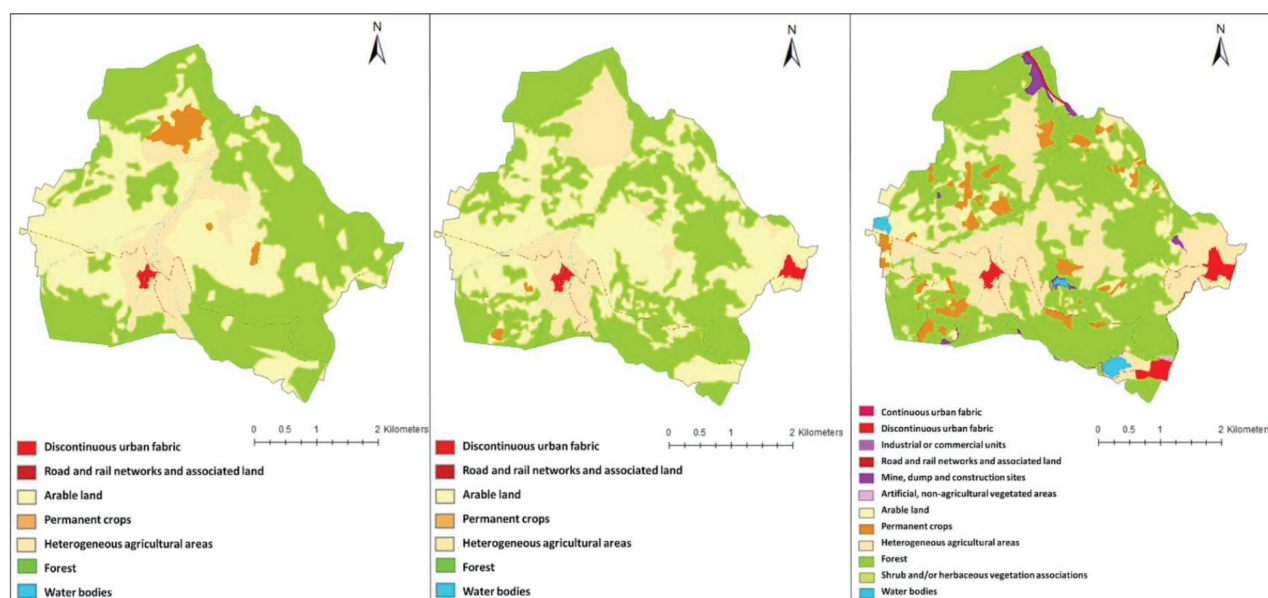


Рис. 3. Карты землепользования в Аксу: (а) 1858 год, (b) 1955 год, (c) 2020 год
Источник изображения: [3]

Реконструкция динамики LULC за более чем полтора столетия позволяет сопоставить эти длительные процессы с демографическими, экономическими, инфраструктурными и пр. изменениями за то же время. Этот прием дает возможность увидеть те факторы, которые в наибольшей мере были синхронизированы с изменениями LULC, а значит, весьма вероятно, внесли значительный вклад в преобразование природной среды изучаемых районов. Такой прием, конечно, возможно применять к динамическим данным; статичные — «одномоментные» — данные далеко не всегда позволяют увидеть сопряжение управляющих и зависимых факторов.

Оба рассматриваемых микрорегиона в течение первого изучаемого периода (1858–1955 гг.) демонстрировали сходные тенденции. Демографический рост, превалирование сельского населения и экстенсивное низкотехнологичное сельское хозяйство обусловили увеличение пахотных земель за счет сокращения территорий иных категорий (лесов и пр.). В этот период, таким образом, тип хозяйствования и демографические процессы определяли трансформацию ландшафта. «Напротив, во второй период, с 1955 по 2020 год, социально-экономические и технологические факторы стали более значимыми, а основными характеристиками этого периода были миграция, расширение городов и развитие промышленности. В этот период Аксу и Кестель пошли по совершенно разным путям. В Кестеле рост населения за счет иммиграции и естественного прироста, а также развитие промышленных зон в связи с близостью к промышленному центру Бурса привели к росту промышленной и жилой застройки, к значительному расширению антропогенно-преобразованных ландшафтов. Таким образом, изменения в структуре землепользования в Кестеле были вызваны ускоренной урбанизацией в Аксу, напротив, отсутствие иммиграции и утрата логистической значимости привели к резкому сокращению численности сельского населения. После строительства новой главной дороги в Бурсе в 1972 году, старая дорога, проходившая через деревню Аксу, утратила свое значение — и экономическая активность в деревне значительно снизилась. Резкое сокращение численности населения Аксу во второй половине XX века объясняет наиболее значительные изменения в структуре землепользования в период с 1955 по 2020 год в регионе Аксу, а именно: превращение пахотных земель в неоднородные сельскохозяйственные угодья и леса. Пахотные земли превратились в земли, покрытые кустарниками, однолетними травами и растениями, из-за постепенного облесения региона после того, как сельскохозяйственные угодья были заброшены» [3].

Урбанизация и индустриализация (в общенациональном масштабе), таким образом, по-разному воздействовали на регионы. Система землепользования позднего традиционного общества (с большой долей распаханых земель) в одном случае сменилась городскими и промышленными территориями, в другом случае — подверглась запустению и вторичной сукцессии. Выбор вектора изменений, очевидно, зависел от изменений логистических маршрутов.

Р. Каньянская и коллеги [4] проследили изменения в структуре землепользования и землеустройства в трех аграрных микрорегионах Словакии с 1782 по 2006 год. Авторы рассмотрели движущие силы изменений LULC отдельно в течение трех исторических периодов: монархического (в составе Австро-Венгерской империи), революционного (начиная от создания Чехословакии в 1918 до Бархатной революции 1989 г. и распада Чехословакии в 1992 году) и современного. Необходимо заметить, что два из рассмотренных участков обладали в разной степени благоприятными для сельского хозяйства условиями, в отличие от третьего участка, располагающегося в горном и предгорном районе. За 224 года ландшафт всех трех участков претерпел значительные изменения.

Доиндустриальный (имперский) период характеризовался занятостью основной массы населения в сельском хозяйстве и медленными темпами социальных и технико-технологических изменений. Низкая товарность и неэффективная агротехника обусловили сильную зависимость большей части населения от природных факторов. «До 1848 года все сельско-

хозяйственные работы выполнялись вручную. Впоследствии основное внимание уделялось использованию тягловой силы животных. Новые технологии внедрялись медленно и не оказывали существенного влияния на землепользование в имперский период» [4]. Развитие промышленности стало значимым фактором лишь после Второй мировой войны.

По сравнению с последующими этапами, население в течение доиндустриального периода было распределено относительно равномерно (пока еще не возник дисбаланс между городами и сельскими районами), а отдельные поселения были небольшими. В таких условиях демографический рост (вместе с экстенсивным развитием сельского хозяйства) настоятельно требовал увеличения площади пахотных земель. Это происходило не только в благоприятных для сельского хозяйства районах, но и в горном районе с наихудшими природно-климатическими условиями.

«Основными движущими силами этого периода были демографические тенденции, в частности — заселение горных районов, чему способствовали политика и земельная реформа, проводимые императрицей Марией Терезией и ее сыном Иосифом II. Технологическое развитие имело второстепенное значение» [4]. Население Словакии росло относительно медленно, но неуклонно: с 1,9 млн в 1786 году до 2,5 млн в 1869 г.; однако на рубеже XIX и XX веков увеличение темпов демографического роста стимулировало аграрный кризис.

Распашка новых земель и усилия государства по упорядочиванию земельных отношений вели к созданию новых деревень и разделению крупных фермерских хозяйств между растущим числом фермерских семей.

«В XX веке можно выделить по меньшей мере четыре крупных переломных момента: (а) аграрный кризис на рубеже веков, (б) земельная реформа 1919 года, (в) коллективизация после 1949 года, (г) трансформация после 1989 года» [4].

В течение второго (революционного) периода (1918–1989 гг.) движущие силы изменения LULC, по мнению авторов, сменились. «Этот период характеризуется прерывистыми нелинейными изменениями в землепользовании и почвенно-растительном покрове в трех исследуемых районах». В плодородных районах пахотные земли демонстрировали прирост, но незначительный (т.к. площадь распашки уже в предшествующем периоде приблизилась к максимально возможной), а в горном районе наблюдалось увеличение лесов за счет сокращения пахотных земель. «В Словакии после Второй мировой войны началась социалистическая индустриализация, которая привела к кардинальным изменениям в сельском хозяйстве. Сельское хозяйство активно субсидировалось, а производство в основном ориентировалось на социалистические рынки. В этот период модели расселения были менее значимыми по сравнению с межвоенным периодом. Несмотря на неблагоприятные условия войны, численность населения постепенно росла. Рост населения способствовал увеличению численности сельского населения, но также привел к росту городов, вызванному началом индустриализации» [4].

В это время урбанизация все более и более определяла социальный облик страны: усиливалась пространственная мобильность граждан, которая выражалась, в частности, в оттоке населения в города. С началом индустриализации значение природных факторов стало уменьшаться, в то время как роль социальных факторов, особенно экономических, усилилась. «В результате индустриализации небольшие производственные предприятия стали появляться не только в городах, но и в сельской местности — за счет сокращения пахотных земель. Кроме того, сокращение площади пахотных земель было связано с созданием крупных кооперативных хозяйств (крупных конюшен, крупных хозяйственных построек). Таким образом, площадь застройки увеличилась во всех трех исследуемых районах» [4]. В менее благоприятном горном регионе не было подходящих условий для крупномасштабного сельскохозяйственного производства на базе кооперативов и государственных хозяйств. Главным результатом социальных перемен здесь стало облесение сельскохозяйственных земель.

«В середине XX века наиболее эффективными факторами интенсификации сельского хозяйства в Словакии были механизация и применение удобрений» [4]. Развитие агротехнологий и повышение производительности труда в сельском хозяйстве также стимулировали отток населения из аграрных районов: потребность местных хозяйств в рабочих руках сокращалась.

«В результате коллективизации мелкие участки, которыми управляли индивидуальные фермеры, были объединены в крупные блоки (полигоны), которыми управляли крупные кооперативные хозяйства. Это привело к уменьшению мозаичности пахотных земель и пастбищ. Важным аспектом было предоставление крупных субсидий сельскому хозяйству в начале 1970-х годов, направленных на расширение сельскохозяйственных предприятий и кооперативов» [4].

Авторы описывают драматические и трудные времена, последовавшие после Бархатной революции. «С 1989 года господдержка сельского хозяйства и пищевой промышленности резко сократилась. Прежние экспортные рынки в социалистической сфере исчезли, цены были либерализованы — и фермеры внезапно столкнулись с нехваткой необходимых ресурсов (например, удобрений) и технологий (например, доступа к технике) для поддержания высоких урожаев. Молодежь мигрировала в города. Все это привело к банкротству многих государственных сельскохозяйственных корпораций и запустению сельскохозяйственных угодий» [4].

Выход из кризиса заключался в возобновлении субсидий сельскому хозяйству со стороны Евросоюза и в переориентации хозяйств на новые более конкурентные рынки, что потребовало повышения отдачи от сельхозресурсов (будь то техника, люди, земли). «Сельское хозяйство переходит к более интенсивному использованию плодородных земель. Менее плодородные почвы постепенно превращаются в пастбища или леса. Как интенсификация, так и экстенсификация сельского хозяйства во многом стали возможны благодаря изменениям в политике. Интенсивным методам производства в значительной степени способствовали ценовые субсидии в рамках Единой сельскохозяйственной политики ЕС» [4].

Авторы резюмируют свое исследование, выделяя основные движущие силы изменений LULC (а заодно — и социальной истории). В имперский период доминирующими факторами были демографические тенденции (рост населения) и характер расселения (колонизация земель), а также эффективная государственная политика в области землепользования (поощрение освоения новых земель, развитие поселенческой сети).

Демографические тенденции и характер расселения в революционный период были менее значимыми. Главной движущей силой этого периода было технологическое развитие, включая интенсификацию сельского хозяйства, внедрение механизации и использование удобрений. Государственная политика не успела оказать глубокого воздействия на LULC, поскольку часто и радикально менялась.

Современный период характеризуется, вероятно, превалированием двух факторов в динамике LULC. Это, во-первых, государственная политика (аграрные субсидии) и демографические процессы (которые, в отличие от имперского периода, оказывают негативное влияние на уровень освоенности районов: люди покидают сельскую местность и стягиваются в города, эмигрируют из страны).

Американские исследователи Дж. Иул и коллеги [5] предприняли масштабное исследование динамики границ ряда городов с начала XX века. Для решения этой задачи они использовали комбинацию современных данных, полученных с помощью дистанционного зондирования («глобальный слой населенных пунктов», Global Human Settlement Layer, GHSL), и отсканированных исторических карт с географической привязкой, датируемых в диапазоне с 1890 по 1960 год. В исследование вошли следующие города и прилегающие районы: Бостон и Атланта (США), Большой Бирмингем и Лондон (Великобритания), Сан-Паулу (Бразилия), Лахор (Пакистан), Амритсар (Индия).

Дж. Иул имеет обширный опыт подобного рода исследований, что нашло отражение во множестве статей, опубликованных возглавляемыми им научными коллективами; данная статья сфокусирована на методологических и инструментальных вопросах: авторы детально описывают исследовательскую технику, позволяющую автоматизировать обработку больших объемов картографического материала.

Предварительная обработка включала ручную привязку исторических карт к местности и создание мозаики (бесшовной комбинации карт или снимков), а также преобразование картографических данных в соответствии с сеткой, используемой в данном исследовании. На рис. 4 видно, что одни и те же картографические данные ($a=c$; $b=d$) могут быть представлены в несколько отличном друг от друга виде, в зависимости от шага используемой сетки (величины ячеек).

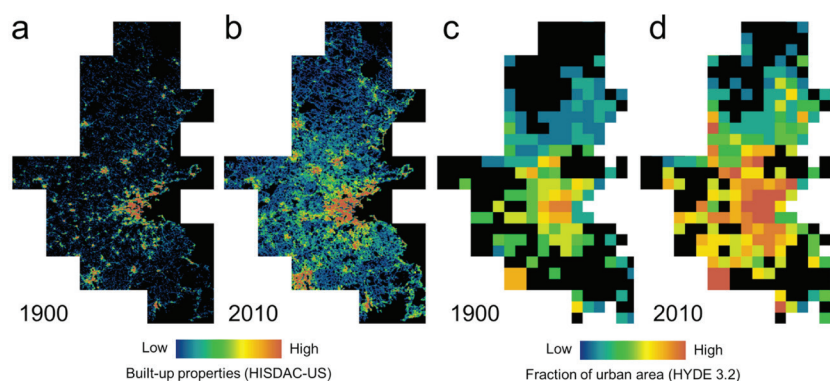


Рис. 4. Компиляция исторических данных о Бостоне и прилегающей территории из разных источников (цветом показана доля городских территорий в каждой ячейке); (a) и (c) – 1900 г.; (b) и (d) – 2010 г.
Источник изображения: [5]

Для каждой ячейки авторы определили долю городских территорий, что позволило проследить процесс роста городов. Для этого авторы решают несколько содержательных и инструментальных проблем. Прежде всего, необходимо понять, каковы атрибуты собственно городской территории – чем она отличается от прилегающих территорий. Затем (после геопривязки карт) необходимо программно идентифицировать долю городской застройки в каждой ячейке. «Процесс выделения городских районов включает в себя этап сегментации карты по цвету без участия человека, интеграцию сигналов карты с данными о застроенных территориях из GHSL, механизм принятия решений на основе правил для определения исторических городских районов и этап пространственной доработки, включающий морфологическую очистку» [5]. Авторы разработали метод «извлечения городских районов» из растровых изображений в диапазоне RGB: «Чтобы сгруппировать цвета каждой отсканированной карты по смыслу, мы выполнили кластеризацию по цветам» [5].

Далее авторы использовали алгоритм принятия решений на основе правил, чтобы определить, какой из полученных цветовых кластеров соответствует городским районам, указанным на исторических картах. Этот механизм работает следующим образом: «Поскольку городские районы на исторических картах обычно изображаются темными или насыщенными цветами (черным, серым, красным), использование простого критерия, основанного на яркости, помогает безошибочно определить правильный целевой кластер (т. е. кластер, идентифицированный как городской район)». Некоторые итоги этих работ представлены на рис. 5.

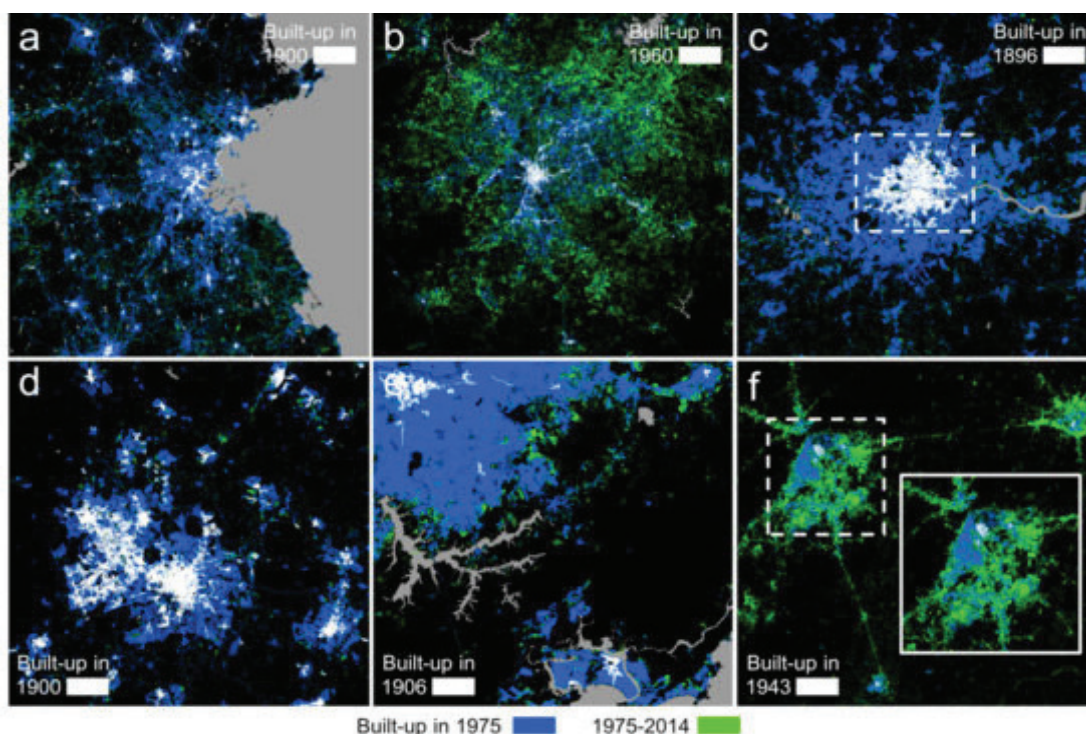


Рис. 5. Выявленные исторические городские районы для всех исследуемых территорий: (а) Бостон, (б) Атланта, (с) Лондон (пунктирным прямоугольником обозначена исследуемая территория), (д) Бирмингем и окрестности, (е) юго-восточная часть Большого Сан-Паулу и (ф) район Лахор-Амритсар с картой Лахора на врезке
Источник изображения: [5]

Авторы особо подчеркивают, что разработанный ими инструментарий цветовой кластеризации для выделения интересующих объектов является экономным в плане ресурсов и источников и, вместе с тем, демонстрирует удовлетворительную производительность и точность. Значимость работы заключается, по их мнению, также в том, что ее исследовательский дизайн позволяет единообразно представить и сопоставить данные разных периодов и разных источников.

Другая статья авторского коллектива во главе с Дж. Иулом [6] посвящена территориальной динамике американских городов: «Наш анализ градостроительных тенденций за последние 100 лет выявил устойчивые закономерности в изменении размеров и плотности городов и их окрестностей, независимо от времени и места застройки. В то же время мы обнаружили, что траектории изменения формы и структуры городов сложнее поддаются кодификации и являются более комплексными. В частности, в наших результатах очевидны основные пространственные преобразования в городах, такие как субурбанизация после Второй мировой войны и растущее формирование взаимосвязанных «мегаполисных» городских систем. Примерно с конца 1950-х годов средний размер жилья и общее количество объектов недвижимости резко возросли, в то время как показатели пространственной компактности начали быстро снижаться. Эти закономерности отражают разрастание городских агломераций за пределы центральных городов и появление новых пригородов в то время» [6].

Американские исследователи Дж. Дорнбьерер и коллеги [1] предложили модель изменений LULC, которую использовали для реконструкции исторических ландшафтов и для прогнозирования динамики LULC района в бассейне реки Делавэр в США в широких хронологических рамках. «Полученная в результате коллекция данных о почвенно-растительном

покрове содержит последовательные сведения за период с 1680 по 2100 год с пространственным разрешением 30 м, интервалом в 10 лет и высокой тематической детализацией» [1]. Авторы особо подчеркивают, что разработанный инструментарий является масштабируемым и может быть использован для реконструкций в масштабах целой страны.

Представленная модель (Forecasting Scenarios of land use, FORE-SCE) опирается, как представляется, в некоторой мере на подходы агентно-ориентированного моделирования. Однако, в отличие от многих иных моделей пространственной динамики, которые используют регулярную сетку с единообразными ячейками, FORE-SCE разбивает географическое пространство на реально существующие участки (прежде всего по критерию владения, что отчасти, очевидно, отражает современный класс землепользования). Каждому участку соответствует некоторое значение (класс LULC/категория земель), которое может меняться во времени (в соответствии с определенными правилами) под влиянием некоторых локальных и общенациональных факторов. Таким образом, задав комбинацию факторов, можно провести вычислительный эксперимент и сгенерировать историческую реконструкцию пространственной динамики LULC (заполнив таким образом лакуны – пробелы, не обеспеченные источниками). В ходе вычислительных экспериментов можно также сформировать спектр сценариев развития землепользования в будущем, «переключение» между которыми зависит от принимаемых решений или возможных изменений. «Одна и та же модельная платформа используется как для реконструкции исторических ландшафтов, так и для прогнозирования будущих ландшафтов» [1]. FORE-SCE учитывает весь набор классов LULC, встречающихся в исследуемом ландшафте.

Подобная модель требует калибровки и верификации на эмпирическом материале (в частности, она должна генерировать ретропрогнозы, совпадающие с известными данными). Авторы обращают внимание на то, что модель в ходе ряда исследований продемонстрировала способность достаточно точно воспроизводить известные реальные процессы. Для создания, калибровки и верификации модели авторы использовали исторические карты и современные данные ДЗЗ.

Каковы управляющие факторы модели и правила, посредством которых они воздействуют на значения участков? «Структура используемой здесь версии FORE-SCE имитирует общую парадигму «спроса» и «пространственного распределения». Основным фактором в рабочем процессе FORE-SCE является временная последовательность количественных предписаний по изменениям для каждой категории земель в конкретном географическом регионе, известная как «спрос». Алгоритмы «пространственного распределения» учитывают «спрос» на региональном уровне и формируют изменения на участках до тех пор, пока не будет удовлетворен спрос для данного сценария и временного этапа» [1].

Пространственное распределение, однако, не является простым и непосредственным отражением спроса (если бы это было так, то, например, при увеличении потребления зерновых в общенациональном масштабе, все земли в ходе вычислительного эксперимента оказались бы автоматически распаханными). «Ключевым элементом алгоритмов пространственного распределения являются так называемые «поверхности пригодности», которые для каждого участка количественно определяют вероятность появления каждого класса земель. Поверхности пригодности играют значимую роль в определении того, где в ландшафте произойдут изменения» [1]. Поверхности пригодности содержат информацию о важных свойствах каждого участка, которые делают его более пригодным для одних способов/классов землепользования и менее пригодным – для других. Так, под воздействием увеличивающегося спроса на фрукты, с наибольшей вероятностью сады появятся на участках, не испытывающих недостатка во влаге и не требующих искусственного орошения.

Причем, сами поверхности пригодности также могут изменяться во времени: они, например, «обновлялись синхронно с прогнозируемыми изменениями климата или доступности водных ресурсов» [1]. Авторы исходят из того, что движущей силой изменений в «спросе» являются,

главным образом, антропогенные факторы. Различные исходные категории земель по-разному реагируют на изменения в землепользовании, связанные с урбанизацией, сельским хозяйством, лесным хозяйством, добычей полезных ископаемых и строительством водохранилищ.

Более того, модель имитирует в некоторой мере связанную динамику смежных кластеров (как пишут авторы – патчей). «Изменения на уровне патчей – это изменения в почвенно-растительном покрове, которые происходят в смежных группах участков и часто связаны с антропогенной деятельностью» [1].

Смоделированная динамика площадей некоторых наиболее обобщенных (агрегированных) категорий земель (в исследованном районе) представлена на рис. 6.

На рис. 7 представлены некоторые результаты моделирования пространственного распределения различных категорий земель.

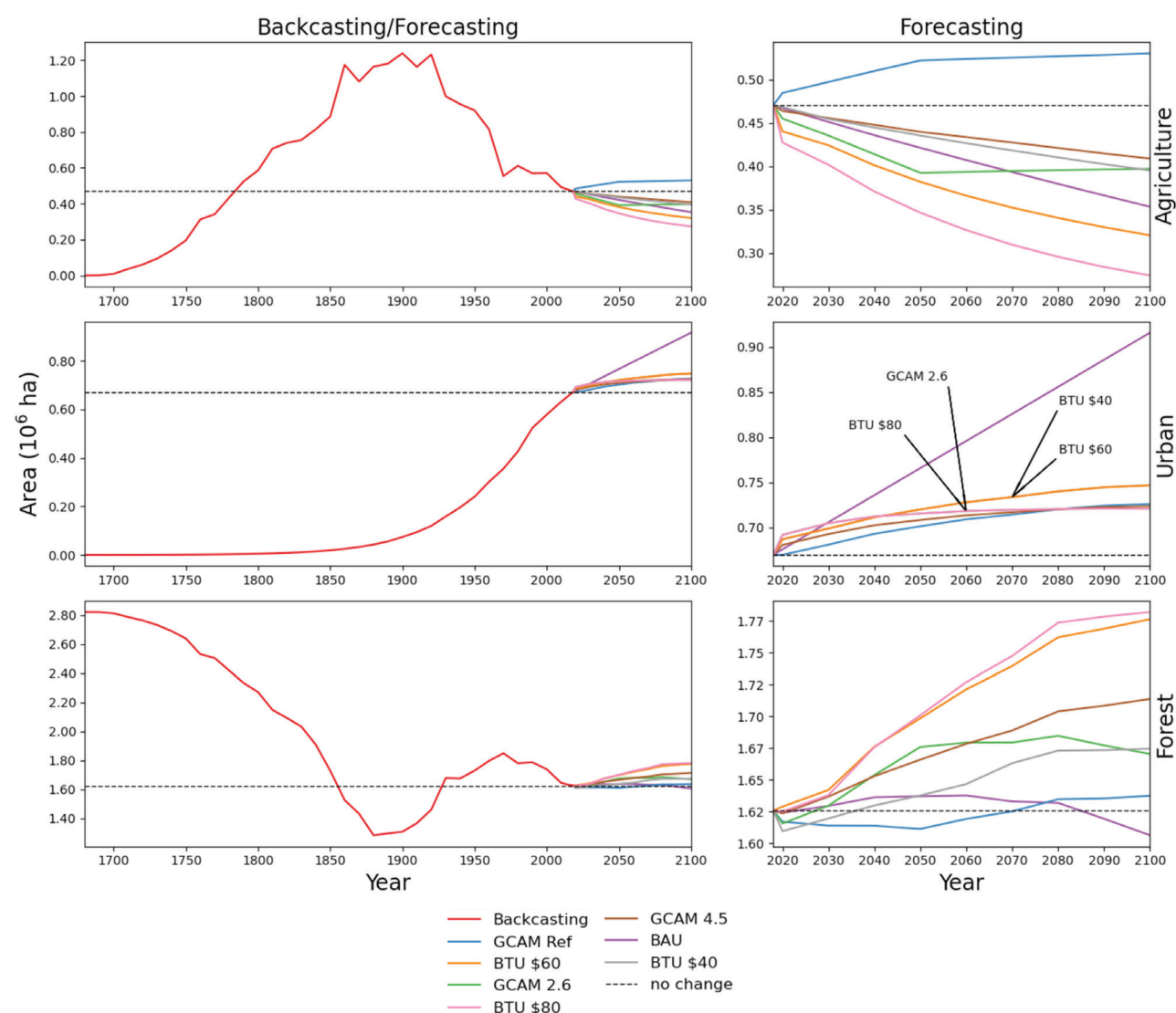


Рис. 6. Сгенерированная моделью динамика площадей, занятых сельскохозяйственными угодьями (верхний ряд), городами (средний ряд) и лесами (нижний ряд) с 1680 по 2100 год в районе бассейна реки Делавэр
Источник изображения: [1]

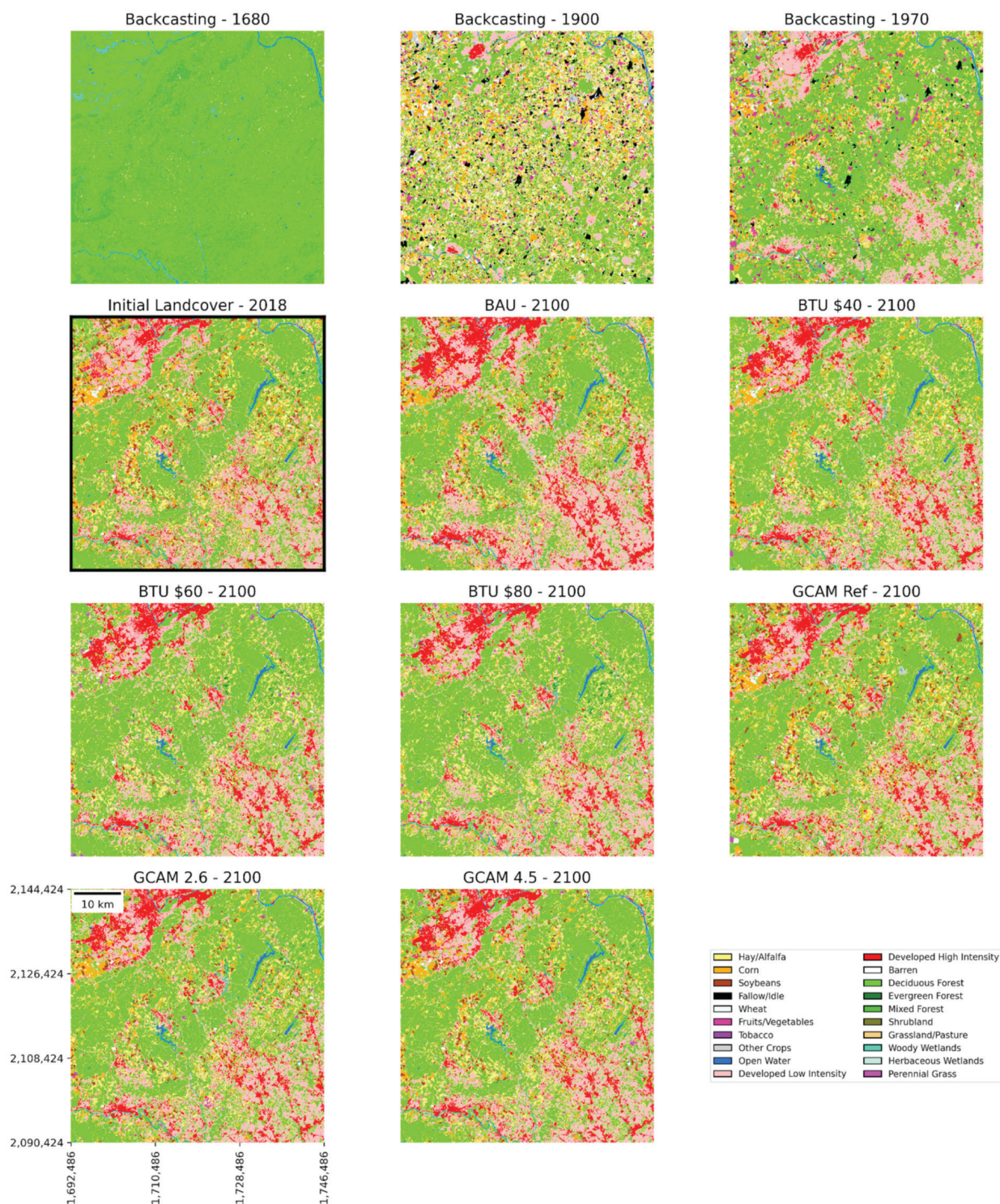


Рис. 7. Сгенерированные моделью размещение и динамика различных категорий земель в исследуемом районе. Верхний ряд — историческая реконструкция в 1680, 1900 и 1970 годах. Второй, третий и четвертый ряды (считая сверху) — совокупность прогностических сценариев на 2100 год в зависимости от величины некоторых управляющих факторов (BAU, BTU, GCAM). Исходное (реальное) состояние на 2018 г. дано в черной рамке

Источник изображения: [1]

«В историческом ландшафте до европейской колонизации в 1680 году преобладали лиственные и смешанные леса. Значительная часть лесов была вырублена к началу XX века, когда регион в целом достиг пика сельскохозяйственной освоенности. С 1900 по 1970 год малопродуктивные сельскохозяйственные угодья на большей части территории региона были заброшены и снова превратились в леса, в результате чего в растущей лесной мозаике осталось гораздо меньше пахотных земель. В XX веке площадь городских земель резко увеличилась, как видно на изображении в северной части» [1].

Методология

В этом разделе мы рассмотрим несколько работ, в которых весьма детально и предметно, на наш взгляд, представлены инструменты, используемые в наиболее распространенных типах исследовательских программ. Глобальным – неизменно используемым во всех представленных в обзоре проектах – является технология ГИС. «Упаковка» в одну ГИС на разных слоях (а в некоторых случаях совмещение на одном слое) исторических сведений, данных ДЗЗ, иных материалов, позволяет делать кросс-темпоральные сопоставления – реконструировать генезис ландшафта.

Х. Лю и Ц. Фу [7] опубликовали теоретико-методологическую обещающую статью, посвященную задачам современной исторической географии (прежде всего, на материалах Китая). Исследователи подчеркивают, что эта субдисциплина имеет важное теоретическое и практическое значение в таких областях, как сохранение культурного наследия, планирование расселения и восстановление природной среды. Магистральное направление развития историко-географических исследований – синтез (на платформах ГИС) и анализ данных из различных источников, в том числе исторических карт, иных исторических источников, данных ДЗЗ, климатических данных и др. «В последние годы в исторической географии в центре внимания оказались такие темы, как изменение климата, история окружающей среды и устойчивое развитие. Для решения этих проблем необходимо использовать методы геологии, дистанционного зондирования, политической и культурной географии» [7]. Эвристическим возможностям ГИС-технологий в истории (т.н. историческим ГИС – HGIS) посвящена работа других китайских исследователей И. Лу и П. Чжана [8].

Интеграция исторических карт в единую среду ГИС должно, конечно, предваряться геопривязкой исторических карт. Более того – нередко возникает необходимость в исправлении погрешностей исторических карт. Это нетривиальная задача, которая в большинстве случаев требует как ручного труда, так и автоматической обработки. Множество исследовательских программ столкнулись с этой проблемой. Заметим, что это один из наиболее сложных и трудоемких этапов работы.

Американские исследователи Дж. Барт и коллеги сфокусировали усилия на развитии методов геопривязки исторических карт. «Для максимального использования в пространственном анализе исторические карты должны быть привязаны к известным системам координат» [9]. Традиционные инструменты геопривязки, по сути, являются ручными и требуют значительного объема ввода данных и масштабирования. Авторы разработали два альтернативных подхода и программное обеспечение для их реализации. Авторы утверждают, что смогли автоматизировать привязку с точностью 88 %. «Обе программы находят контрольные точки с точностью до одного пикселя, выдают ошибки преобразования порядка ширины линии карты и могут создавать искаженные или неискаженные изображения по желанию пользователя» [9].

Динамика LULC выражается в трансформации объектов (как точечных, так и полигонов). Поэтому геопривязка ценна не только сама по себе, но и тем, что позволяет перейти к сравнению (иногда кросс-темпоральному) объектов на картах (это могут быть или отдельные строения/развалины/фундаменты или площади, занятые разными категориями земель, и многое другое). Однако для количественного (и, если потребуется, автоматизированного) анализа трансформации объектов, требуется сначала эти объекты выделить в векторном виде.

Векторизация изначально растровых изображений (как исторических карт, так и аэро- и космических снимков), а также выделение объектов на картах или снимках могут быть осуществлены в ручном режиме. Это, конечно, требует больших трудозатрат и вносит в исследование некоторый субъективный взгляд эксперта. Поэтому (в дополнение к экспертным методам разметки карт) развиваются автоматизированные.

Сообщение французских исследователей И. Чена и коллег [10] посвящено частной (но ключевой в рассматриваемом исследовательском дизайне) инструментальной проблеме — векторизации исторических карт и выявлению на них отдельных объектов. Далеко не всегда эта проблема может быть решена в ручном режиме, поскольку требует значительных трудозатрат (а если этим занимаются несколько людей, то возникает непростая задача унификации их подходов к выполнению такой работы). «Карты на протяжении веков были уникальным источником знаний. — Пишут И. Чен и коллеги. — Такие исторические документы предоставляют бесценную информацию для анализа сложных пространственных преобразований ландшафтов на протяжении важных периодов времени. Большое количество и значительное разнообразие картографических источников требуют применения методов автоматической обработки изображений для выделения соответствующих объектов. Сложность карт (текст, шум, артефакты оцифровки и т.д.) на протяжении десятилетий препятствовала разработке универсальных и эффективных подходов к преобразованию растра в вектор. Мы предлагаем обучаемое, воспроизводимое и повторно используемое решение для автоматического преобразования растровых карт в векторные объекты» [10].

Предложенное программное обеспечение (основанное на нейронных сетях) протестировано на объектах городской среды и дало обнадеживающие результаты. Программный код, набор данных, результаты и дополнительные иллюстрации находятся в свободном доступе в Интернете.

Швейцарский исследователь Р. Петитпьер [11] развивает модель сегментации (и, соответственно, векторизации) исторических карт посредством искусственного интеллекта (сверточных нейронных сетей), используя при этом обширные картографические коллекции.

Ц. Чжоу и коллеги [12] также использовали нейронные сети, но для другой задачи — для автоматической идентификации типа карты. И хотя это частная задача, появление такого рода исследований знаменует бурное развитие нового подхода, предусматривающего использование ИИ (искусственного интеллекта) для исследования геоданных (т.н. GeoAI).

В. Дуан и коллеги [13] также развивают методологию извлечения из исторических карт сведений посредством ИИ, а именно — сверточных нейронных сетей. Речь идет об автоматическом распознавании объектов. «Наша система использует современные векторные данные для автоматической разметки примеров интересующих географических объектов на исторических картах в качестве обучающих выборок для ИИ» [13].

В некоторых исследовательских программах сопоставление геоданных не является конечной точкой обработки исходного материала: иногда ставится задача агрегации данных из нескольких источников. Это естественным образом порождает вопрос: как можно «объединить», например, спутниковые снимки начала XXI века и кадастровую карту середины XIX века?

К. Сун и коллеги [14] предложили набор инструментов на основе ИИ для автоматизации весьма сложной задачи — сведение и обобщение сведений с нескольких исторических карт. «Чтобы упростить использование географической информации, содержащейся в исторических картах, можно создать на их основе граф географических знаний (ГГЗ, geographic knowledge graph, GKG). В этой статье предлагается общий алгоритм для выполнения одного из важных этапов создания такого графа, а именно для сопоставления одних и тех же географических объектов на разных картах» [14].

Понятие ГГЗ раскрывается в статье Ш. Ванга и коллег [15]. Это способ формализованного и (что весьма важно) машиночитаемого представления знаний. Граф включает два типа элементов: вершины (материальные или нематериальные объекты) и связи между ними, которые могут иметь направление, а также некоторые атрибуты (указывающие на силу

и характер воздействия одного объекта на другой). В узлах ГГЗ могут располагаться, например, природные объекты, социальные сообщества. ГГЗ является «географической разновидностью» общей концепции графа знаний, продвигаемой корпорацией Google для унификации форматов знаний и автоматизации их обобщения.

Пример ГГЗ представлен на рис. 8. Этот ГГЗ формализует знания о взаимодействии растущего города – Нанкина – с основными объектами окружающей среды.

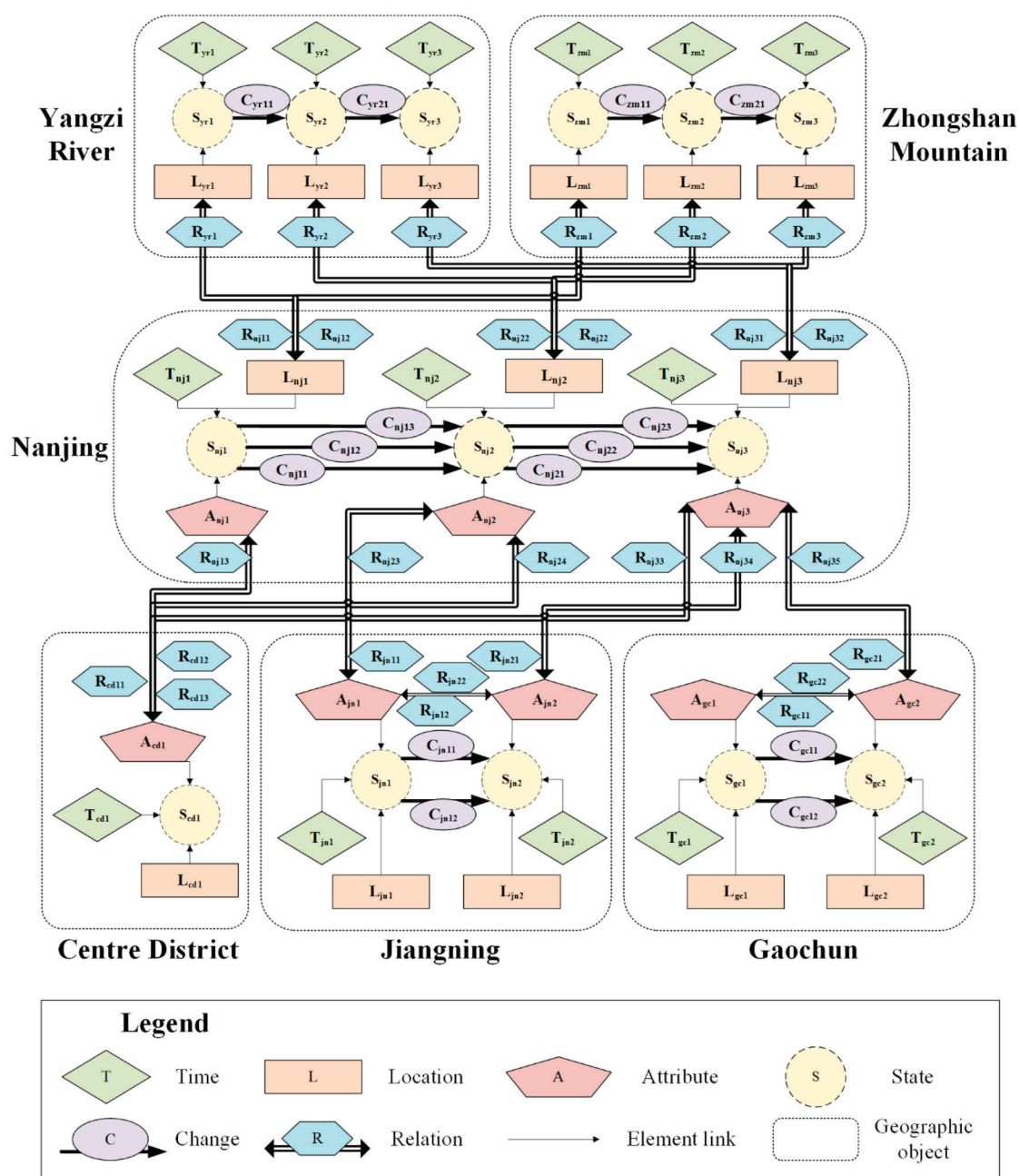


Рис. 8. Обзор эволюции административного деления Нанкина и объектов природной среды
Источник изображения: [15]

Рассматриваемый в нашем обзоре подход обладает настолько высокой гибкостью, что включает в себя исследования как микрорегионов (от нескольких десятков кв. км), так и изучение обширных территорий отдельных стран. Естественно, инструментарий микрорегиональных исследований допускает ручную интерпретацию данных ДЗЗ и исторических карт; тем не менее, общность исследовательского дизайна микро- и макроисследований очевидна. В качестве примера микроисследований на основе исторических карт и ДЗЗ приведем работу российских историков — Е.С. Гришина и коллег [16], а в качестве примера макро-масштабного исследования — публикацию китайских специалистов Г. Ву и коллег [17]. В ходе их работы была создана схема мониторинга исторических городов при поддержке технологий дистанционного зондирования.

Тематики

Значительная часть исследовательских программ построена на фиксации (через некоторые временные промежутки) изменения площади и расположения различных классов LULC. Динамика тех или иных категорий земель непосредственно связана с изменениями в способах хозяйствования и образе жизни людей. Поэтому подобного рода подход является эвристически продуктивным. В рамках такового подхода имеется множество вариантов исследовательских программ, спектр которых мы попытались представить ниже.

Турецкие исследователи М. Кабадай и коллеги [18] изучили два района в Пловдивской области Болгарии, чтобы выявить динамику заброшенных сельскохозяйственных угодий. Исследователи опирались на аэрофотоснимки и спутниковые изображения, датируемые периодом с 1950-х по 1980-е годы, а также на официальные данные переписи населения.

Греческие ученые Ф. Ксистракис и коллеги [19] зафиксировали и нанесли на карту временные изменения в классах землепользования и почвенно-растительного покрова в номе (префектуре) Этолоакарнания (Греция) по аэрофотоснимкам с 1945 по 2009 г. Авторы применили автоматизированный анализ снимков. Результаты показали, что сельскохозяйственные угодья увеличились в первые послевоенные годы. Послевоенная потребность в сельскохозяйственной продукции вынудила население возделывать поля на малопродуктивных участках. В последующие десятилетия, особенно после 1960-х гг., некоторые сельскохозяйственные угодья пришли в запустение. С середины 1980-х гг. этот процесс стал масштабным. Запустение земель сочетается с одновременным уплотнением кустарниковых зарослей и лесов на возвышенностях. Радикальные социально-экономические изменения, произошедшие в 1960-х годах, привели к миграции сельского населения в крупные города и к развитию туристической индустрии.

Авторы утверждают, что Греция не является исключением из общих тенденций, присущих Восточной и Юго-Восточной Европе: «Мы утверждаем, что эти социально-экономические изменения сыграли важную роль в формировании наблюдаемых изменений в структуре землепользования. Ландшафтные изменения высокой интенсивности также наблюдались в постсоциалистических странах, включая территории бывшего Советского Союза. Считается, что причиной таких изменений стал переход от централизованного режима к приватизации. Отказ от использования сельскохозяйственных земель был доминирующим процессом, однако в разных странах и регионах он происходил с разной интенсивностью. Все исследования сходятся в том, что отказ от использования сельскохозяйственных земель в постсоциалистических странах касается малопродуктивных участков. Заброшенность земель влечет за собой ряд экологических последствий, которые проявляются в различных пространственных масштабах» [19].

Эфиопские ученые М. Минта и коллеги [20] использовали аэрофотоснимки, сделанные в 1957 и 1995 годах, а также снимки со спутника Landsat, сделанные в 1995 и 2014 годах, для анализа исторических изменений в структуре землепользования и землеустройства в холмисто-горных районах Денди и Джелду в центральной части Эфиопии. В 1957 году основными категориями земель были пастбища, обрабатываемые земли (пахотные земли) и лесные уго-

дья, занимавшие 49, 25 и 20 % от общей площади соответственно. В последующее время заметные изменения в категориях земель были связаны с расширением обрабатываемых земель (сейчас они занимают 68 % от общей площади), при этом обширные территории остались под пастбищами. Вырубка лесов была бы более масштабной, если бы лес Чилимо (остатки сухих афромонтановых лесов) не находился под охраной государства.

Р. Попелькова и М. Мулькова [21] провели пространственно-временной анализ изменений почвенно-растительного покрова в районе Остравско-Карвинского угольного бассейна в Чешской Республике в период с 1836 по 2009 год, используя кадастровые карты и ортофотоплан. Авторы выделили несколько ключевых процессов, которые в разное время доминировали в динамике LULC: распахка сельхозземель и вырубка лесов, урбанизация и рост промышленных и добывающих секторов, интенсификация сельского хозяйства и запустение (в т.ч. облесение) земель и др.

М. Драммонд и коллеги [22] использовали исторические карты северной части Фронт-Рейнджа в Колорадо (США) с 1937 по 1997 год. В исследование были вовлечены и аэрофотоснимки. В общей сложности с помощью методов ручной интерпретации было выделено 38 классов земель, используемых для ведения сельского хозяйства и для заселения, и изучена их пространственно-временная динамика.

С. Казинс [23] проанализировала изменения в землепользовании и лесном хозяйстве в Швеции с помощью комплексного изучения исторических кадастровых карт XVII и XVIII веков и аэрофотоснимков 1945 и 1981 годов. «Традиционные методы корректировки исторических карт с использованием совпадающих точек на ортофотоснимках или современных картах не дают удовлетворительных результатов, поскольку на картах остаются внутренние неточности. В этом исследовании представлен метод корректировки карт с помощью локального деформирования, позволяющий устранить геометрические несоответствия. Кроме того, были рассчитаны изменения в почвенно-растительном покрове. Была проанализирована площадь пахотных земель и пастбищ в зависимости от характеристик почвы и непрерывности землепользования» [23].

Д. Балк и коллеги [24] исследовали динамику городских территорий США в конце XX – начале XXI века. В их работе сравниваются городские кварталы, выделенные в ходе переписи населения, с косвенными показателями классификации застроенных территорий Глобального слоя населенных пунктов (Global Human Settlement Layer, GHSL) за 1990 – 2010 годы. Оказалось, что большая часть земель, застроенных более чем на 50 %, и люди, живущие на таких землях, официально классифицируются как городские. Однако 30 % городского населения и земель, указанных в переписи, расположены в менее застроенных районах, которые можно охарактеризовать как пригородные и субурбанизированные.

Чешские исследователи Я. Скалош и коллеги [25] поставили цель описать и выявить закономерности долгосрочных изменений почвенно-растительного покрова на основе исторических топографических карт и ортофотопланов в среде ГИС за период более 250 лет. Исследование проводилось в низменной местности Нове Двор и Жегушице в Чешской Республике (общая площадь 113 кв. км). Авторы установили, что «наиболее заметным изменением стал рост площади пахотных земель (с 53 % до 67 %)\», а также сокращение площади других классов LULC.

Заключение

Мы рассмотрели новейшие работы, исследовательский дизайн которых сочетает использование исторических карт и данных ДЗЗ. Большинство таких работ сосредоточены на пространственно-временном анализе динамики LULC (классов землепользования и почвенно-растительного покрова). Понимание такой динамики позволяет исследователям выявить ключевые антропогенные факторы изменений окружающей среды, а также увидеть воздействие природных сил на жизнедеятельность людей и, если говорить шире, на исторические процессы.

В разделе «Кейсы» мы представили четыре подробных разбора исследовательских программ, которые демонстрируют классические и перспективные исследовательские стратегии. Были показаны объекты, этапы работ, результаты.

Раздел «Методология» представляет ключевые инструментальные проблемы (и пути их решения), возникающие при изучении пространственно-природных аспектов социальной истории. Рассмотрены, в частности, техника геопривязки и исправления неточностей исторических карт, векторизация растровых картографических материалов, автоматическое выявление объектов, синтез картографических данных.

Раздел «Тематики» посвящен ответу на вопрос, каковы обычные предметы исследований в рамках рассматриваемого подхода и какое приращение знаний может быть получено в ходе такого рода исследований.

В целом, подход, предусматривающий изучение пространственно-временной динамики взаимодействия природы и общества, следует считать весьма продуктивным для изучения движущих сил социальной истории.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-18-00310.

Список литературы

1. Dornbierer J., Wika S., Robison C., Rouze G., Sohl T. Prototyping a methodology for long-term (1680–2100) historical-to-future landscape modeling for the conterminous United States // *Land*. 2021. Vol. 10. № 5. DOI: 10.3390/land10050536.
2. Жуков Д.С., Лямин С.К., Кунавин К.С. Опыт использования аэрофотосъемки и исторических карт в исторических исследованиях. Литература, методы, кейсы // *Инноватика и экспертиза: научные труды*. 2019. № 3(28). С. 44–63. DOI: 10.35264/1996-2274-2019-3-44-63.
3. Ettehad Osgouei P., Sertel E., Kabaday M.E. Integrated usage of historical geospatial data and modern satellite images reveal long-term land use/cover changes in Bursa/Turkey, 1858–2020 // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. № 1. P. 9077. DOI: 10.1038/s41598-022-11396-1.
4. Kanianska R., Kizeková M., Nováček J., Zeman M. Land-use and land-cover changes in rural areas during different political systems: A case study of Slovakia from 1782 to 2006 // *Land Use Policy*. 2014. Vol. 36. P. 554–566. DOI: 10.1016/j.landusepol.2013.09.018.
5. Uhl J.H., Leyk S., Li Z., Duan W., Shbita B., Chiang Y.-Y., Knoblock C.A. Combining remote-sensing-derived data and historical maps for long-term back-casting of urban extents // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. № 18. DOI: 10.3390/rs13183672.
6. Uhl J.H., Connor D.S., Leyk S., Braswell A.E. A century of decoupling size and structure of urban spaces in the United States // *Communications Earth & Environment*. 2021. Vol. 2. № 1. P. 20. DOI: 10.1038/s43247-020-00082-7.
7. Liu H., Fu J. The research progress and prospects of historical geography: A systematic review of the disciplinary framework, research content, and methodology // *Geographical Research Bulletin*. 2025. Vol. 4. P. 610–642. DOI: 10.50908/grb.4.0_610.
8. Lu Y., Zhang P. GIS for Chinese history research // *Spatial Synthesis: Computational Social Science and Humanities* / ed. Ye X., Lin H. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 39–51. DOI: 10.1007/978-3-030-52734-1_4.
9. Burt J.E., White J., Allord G., Then K.M., Zhu A.-X. Automated and semi-automated map georeferencing // *Cartography and Geographic Information Science*. Taylor & Francis, 2020. Vol. 47. № 1. P. 46–66. DOI: 10.1080/15230406.2019.1604161.
10. Chen, Y., Carlinet, E., Chazalon, J., Mallet, C., Duménieu, B., Perret J. Vectorization of historical maps using deep edge filtering and closed shape extraction // Lladós J., Lopresti D., Uchida S. (eds) *Document Analysis and Recognition – ICDAR*. 2021. Cham: Springer. P. 510–525. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-86337-1_34.

11. Petitpierre R. Neural networks for semantic segmentation of historical city maps: Cross-cultural performance and the impact of figurative diversity // arXiv. Unpublished, 2020. arXiv:2101.12478. DOI: 10.13140/RG.2.2.10973.64484.
12. Zhou X., Li W., Arundel S.T., Liu J. Deep Convolutional Neural Networks for Map-Type Classification // arXiv. 2018. Vol. arXiv:1805.10402. DOI: <https://arxiv.org/abs/1805.10402>.
13. Duan W., Chiang Y.-Y., Knoblock C.A., Jain V., Feldman D., Uhl J.H., Leyk S. Automatic alignment of geographic features in contemporary vector data and historical maps // Proceedings of the 1st Workshop on Artificial Intelligence and Deep Learning for Geographic Knowledge Discovery. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2017. P. 45–54. DOI: 10.1145/3149808.3149816.
14. Sun K., Hu Y., Song J., Zhu Y. Aligning geographic entities from historical maps for building knowledge graphs // International Journal of Geographical Information Science. Taylor & Francis, 2021. Vol. 35. № 10. P. 2078–2107. DOI: 10.1080/13658816.2020.1845702.
15. Wang S., Zhang X., Ye P., Du M., Lu Y., Xue H. Geographic knowledge graph (GeoKG): A formalized geographic knowledge representation // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. Vol. 8. № 4. DOI: 10.3390/ijgi8040184.
16. Grishin E.S., Kanishchev V.V., Kunavin K.S., Lyamin S.K., Zhukov D.S. Studying the social history of a Russian microregion, based on historical maps and aerial survey // Vestnik of Saint Petersburg University. History. 2021. T. 66. № 3. C. 990–1011. DOI: 10.21638/11701/spbu02.2021.317.
17. Wu G., Dang A., Chen M., Li X. Study on historical cities conservation monitoring supported by high-resolution remote sensing // International Review for Spatial Planning and Sustainable Development. 2023. Vol. 11. № 2. P. 240–258. DOI: 10.14246/irspds.11.2_240.
18. Kabaday M.E., Ettehad Osgouei P., Sertel E. Agricultural land abandonment in Bulgaria: A long-term remote sensing perspective, 1950–1980 // Land. 2022. Vol. 11. № 10. DOI: 10.3390/land11101855.
19. Xystrakis F., Psarras T., Koutsias N. A process-based land use/land cover change assessment on a mountainous area of Greece during 1945–2009: Signs of socio-economic drivers // Science of The Total Environment. 2017. Vol. 587–588. P. 360–370. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.161.
20. Minta M., Kibret K., Thorne P., Nigussie T., Nigatu L. Land use and land cover dynamics in Dendi-Jeldu hilly-mountainous areas in the central Ethiopian highlands // Geoderma. 2018. Vol. 314. P. 27–36. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.10.035.
21. Popelková R., Mulková M. The mining landscape of the Ostrava-Karviná coalfield: Processes of landscape change from the 1830s to the beginning of the 21st century // Applied Geography. 2018. Vol. 90. P. 28–43. DOI: 10.1016/j.apgeog.2017.11.008.
22. Drummond M.A., Stier M.P., Diffendorfer J. (Jay) E. Historical land use and land cover for assessing the northern Colorado Front Range urban landscape // Journal of Maps. Taylor & Francis, 2019. Vol. 15. № 2. P. 89–93. DOI: 10.1080/17445647.2018.1548383.
23. Cousins S.A.O. Analysis of land-cover transitions based on 17th and 18th century cadastral maps and aerial photographs // Landscape Ecology. 2001. Vol. 16. № 1. P. 41–54. DOI: 10.1023/A:1008108704358.
24. Balk D., Leyk S., Jones B., Montgomery M.R., Clark A. Understanding urbanization: A study of census and satellite-derived urban classes in the United States, 1990–2010 // PLOS ONE. Public Library of Science, 2018. Vol. 13. № 12. P. e0208487. DOI: 10.1371/journal.pone.0208487.
25. Skaloš J., Weber M., Lipský Z., Trpáková I., Šantrůčková M., Uhlířová L., Kukla P. Using old military survey maps and orthophotograph maps to analyse long-term land cover changes – Case study (Czech Republic) // Applied Geography. 2011. Vol. 31. № 2. P. 426–438. DOI: 10.1016/j.apgeog.2010.10.004.

References

1. Dornbierer J., Wika S., Robison C., Rouze G., Sohl T. (2021) Prototyping a methodology for long-term (1680–2100) historical-to-future landscape modeling for the conterminous United States. Land. Vol. 10. No 5. DOI: 10.3390/land10050536.

2. Zhukov D.S., Lyamin S.K., Kunavin K.S. (2019) *Opyt ispol'zovaniya aerofotos'yemki i istoricheskikh kart v istoricheskikh issledovaniyakh. Literatura, metody, keysy* [Experience in using aerial photography and historical maps in historical research. Literature, methods, cases] *Innovatika i ekspertiza* [Innovatics and Expert Examination]. Issue 3(28). P. 44–63. DOI: 10.35264/1996-2274-2019-3-44-63.
3. Ettehadi Osgouei P., Sertel E., Kabaday M.E. (2022) Integrated usage of historical geospatial data and modern satellite images reveal long-term land use/cover changes in Bursa/Turkey, 1858–2020. *Scientific Reports*. Vol. 12. No 1. P. 9077. DOI: 10.1038/s41598-022-11396-1.
4. Kanianska R., Kizeková M., Nováček J., Zeman M. (2014) Land-use and land-cover changes in rural areas during different political systems: A case study of Slovakia from 1782 to 2006. *Land Use Policy*. Vol. 36. P. 554–566. DOI: 10.1016/j.landusepol.2013.09.018.
5. Uhl J.H., Leyk S., Li Z., Duan W., Shbita B., Chiang Y.-Y., Knoblock C.A. (2021) Combining remote-sensing-derived data and historical maps for long-term back-casting of urban extents. *Remote Sensing*. Vol. 13. No 18. DOI: 10.3390/rs13183672.
6. Uhl J.H., Connor D.S., Leyk S., Braswell A.E. (2021) A century of decoupling size and structure of urban spaces in the United States. *Communications Earth & Environment*. Vol. 2. No 1. P. 20. DOI: 10.1038/s43247-020-00082-7.
7. Liu H., Fu J. (2025) The research progress and prospects of historical geography: A systematic review of the disciplinary framework, research content, and methodology. *Geographical Research Bulletin*. Vol. 4. P. 610–642. DOI: 10.50908/grb.4.0_610.
8. Lu Y., Zhang P. (2020) GIS for Chinese history research. *Spatial Synthesis: Computational Social Science and Humanities* / ed. Ye X., Lin H. Cham: Springer International Publishing. P. 39–51. DOI: 10.1007/978-3-030-52734-1_4.
9. Burt J.E., White J., Allord G., Then K.M., Zhu A.-X. (Vol) *Automated and semi-automated map georeferencing. Cartography and Geographic Information Science*. Taylor & Francis, 2020. 47. No 1. P. 46–66. DOI: 10.1080/15230406.2019.1604161.
10. Chen, Y., Carlinet, E., Chazalon, J., Mallet, C., Duménieu, B., Perret J. Vectorization of historical maps using deep edge filtering and closed shape extraction. Lladós J., Lopresti D., Uchida S. (eds) *Document Analysis and Recognition – ICDAR*. 2021. Cham: Springer. P. 510–525. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-86337-1_34.
11. Petitpierre R. (2020) Neural networks for semantic segmentation of historical city maps: Cross-cultural performance and the impact of figurative diversity. *arXiv*. arXiv:2101.12478. DOI: 10.13140/RG.2.2.10973.64484.
12. Zhou X., Li W., Arundel S.T., Liu J. (2018) Deep Convolutional Neural Networks for Map-Type Classification. *arXiv*. Vol. arXiv:1805.10402. DOI: <https://arxiv.org/abs/1805.10402>.
13. Duan W., Chiang Y.-Y., Knoblock C.A., Jain V., Feldman D., Uhl J.H., Leyk S. (2017) Automatic alignment of geographic features in contemporary vector data and historical maps. *Proceedings of the 1st Workshop on Artificial Intelligence and Deep Learning for Geographic Knowledge Discovery*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. P. 45–54. DOI: 10.1145/3149808.3149816.
14. Sun K., Hu Y., Song J., Zhu Y. (2021) Aligning geographic entities from historical maps for building knowledge graphs. *International Journal of Geographical Information Science*. Taylor & Francis. Vol. 35. No 10. P. 2078–2107. DOI: 10.1080/13658816.2020.1845702.
15. Wang S., Zhang X., Ye P., Du M., Lu Y., Xue H. (2019) Geographic knowledge graph (GeoKG): A formalized geographic knowledge representation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. Vol. 8. No 4. DOI: 10.3390/ijgi8040184.
16. Grishin E.S., Kanishchev V.V., Kunavin K.S., Lyamin S.K., Zhukov D.S. (2021) Studying the social history of a Russian microregion, based on historical maps and aerial survey. *Vestnik of Saint Petersburg University. History*. T. 66. No 3. C. 990–1011. DOI: 10.21638/11701/spbu02.2021.317.
17. Wu G., Dang A., Chen M., Li X. (2023) Study on historical cities conservation monitoring supported by high-resolution remote sensing. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*. Vol. 11. No 2. P. 240–258. DOI: 10.14246/irspsd.11.2_240.

18. Kabaday M.E., Ettehadí Osgouei P., Sertel E. (2022) Agricultural land abandonment in Bulgaria: A long-term remote sensing perspective, 1950–1980. *Land*. Vol. 11. No 10. DOI: 10.3390/land11101855.
19. Xystrakis F., Psarras T., Koutsias N. (2017) A process-based land use/land cover change assessment on a mountainous area of Greece during 1945–2009: Signs of socio-economic drivers. *Science of The Total Environment*. Vol. 587–588. P. 360–370. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.161.
20. Minta M., Kibret K., Thorne P., Nigussie T., Nigatu L. (2018) Land use and land cover dynamics in Dendi-Jeldu hilly-mountainous areas in the central Ethiopian highlands. *Geoderma*. Vol. 314. P. 27–36. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.10.035.
21. Popelková R., Mulková M. The mining landscape of the Ostrava-Karviná coalfield: Processes of landscape change from the 1830s to the beginning of the 21st century. *Applied Geography*. 2018. Vol. 90. P. 28–43. DOI: 10.1016/j.apgeog.2017.11.008.
22. Drummond M.A., Stier M.P., Diffendorfer J. (Jay) E. (2019) Historical land use and land cover for assessing the northern Colorado Front Range urban landscape. *Journal of Maps*. Taylor & Francis. Vol. 15. No 2. P. 89–93. DOI: 10.1080/17445647.2018.1548383.
23. Cousins S.A.O. (2001) Analysis of land-cover transitions based on 17th and 18th century cadastral maps and aerial photographs. *Landscape Ecology*. Vol. 16. No 1. P. 41–54. DOI: 10.1023/A:1008108704358.
24. Balk D., Leyk S., Jones B., Montgomery M.R., Clark A. (2018) Understanding urbanization: A study of census and satellite-derived urban classes in the United States, 1990–2010. *PLOS ONE*. Public Library of Science. Vol. 13. No 12. P. e0208487. DOI: 10.1371/journal.pone.0208487.
25. Skaloš J., Weber M., Lipský Z., Trpáková I., Šantrůčková M., Uhlířová L., Kukla P. (2011) Using old military survey maps and orthophotograph maps to analyse long-term land cover changes – Case study (Czech Republic). *Applied Geography*. Vol. 31. № 2. P. 426–438. DOI: 10.1016/j.apgeog.2010.10.004.