

Количественный анализ многозональных космических изображений городских агломераций. Часть 1

В.А.Малинников, МИИГАиК, Москва

Чан Тиен Ранг, МИИГАиК, Москва

В статье на основе экспериментальных исследований показана возможность использования современных методов автоматизированной обработки многозональных космических изображений для изучения пространственной структуры городских агломераций и оценки состояния составляющих урбандошфта. В первой части статьи приводятся результаты использования классификационного и линеаментного анализа. Показана полезность использования данных видов анализа для количественной оценки составляющих урбандошфта и пространственной структуры городской агломерации. Во второй части статьи приводятся результаты использования мультифрактального анализа и метода диаграмм «энтропия – сложность» для количественного описания пространственной организации и степени структурной вариабельности городских агломераций по их космическим изображениям. Рассчитанные мультифрактальные спектры демонстрируют изменчивость мультифрактальных характеристик для различных городских агломераций мегаполиса Ханой, указывающую на неоднородность пространственной структуры мегаполиса, которая может быть параметризована с помощью мультифрактальных спектров.

Перспективность использования количественного анализа космических изображений заключается в том, что на его основе можно выполнить анализ и оценку пространственной структуры городской агломерации в целом и входящих в её границы городских поселений с опорой на количественные критерии, определяемые дистанционными методами.

Ключевые слова: городская агломерация, пространственная структура, многозональное космическое изображение, урбандошфт, классификационный анализ, линеаментный анализ, мультифрактальный анализ, диаграмма «энтропия – сложность»

Quantitative Analysis of Multispectral Space Images of Urban Agglomerations. Part 1.

V.A.Malinnikov, MIIGAiK, Moscow

Chan Tien Rang, MIIGAiK, Moscow

The article on the basis of experimental studies shows the possibility of using modern methods of automated processing of multispectral space images to study the spatial structure of urban agglomerations and assess the state of the components of the urban landscape. The first part of the article presents the results of the use of classification and lineament analysis for the matic interpretation of multispectral space images of

urban agglomerations. The second part of the article presents the results of the use of multifractal analysis and the method of diagrams "entropy – complexity" for the quantitative description of the spatial organization and the degree of structural variability of urban agglomerations in their space images. The calculated multifractal spectra demonstrate the variability of multifractal characteristics for different urban agglomerations of the Hanoi metropolis, indicating the heterogeneity of the spatial structure of the metropolis, which can be parametrized by multifractal spectra.

The prospects of using quantitative analysis of satellite images lies in the fact that on its basis it is possible to perform analysis and evaluation of the spatial structure of urban agglomeration in General, and within its boundaries of urban settlements based on quantitative criteria, determined by remote sensing.

Keywords: urban agglomeration, spatial structure, multispectral space image, urban landscape, classification analysis, lineament analysis, multifractal analysis, "entropy – complexity diagram".

Центральной задачей современной урбанистики является постоянное совершенствование теоретических и методологических подходов к определению пространственной структуры городских агломераций с учётом различных факторов, влияющих на их развитие. Основными факторами, определяющими развитие городских агломераций как формы организации пространства являются: объекты городской инфраструктуры, размещение линий транспорта, территориальная протяжённость границ населённых пунктов, состояние природной среды территории и другие [1].

За последние годы произошли серьёзные изменения в количественных методах урбанистики, что во многом обусловлено внедрением в исследования городских агломераций материалов аэро- и космических съёмки. Можно упрощённо представить два варианта участия космических данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) в изучении городских агломераций. В первом варианте участие ограничивается топографической поддержкой исследовательского проекта в условиях отсутствия или неполноты картографического материала – немаловажна доступность исходных космических снимков, которые относительно несложно превратить в геокодированные пространственные данные. Технология обработки данных в этом случае сводится к предварительной

радиояркостной коррекции изображений и их трансформации по наборам опорных точек. В наиболее последовательном подходе растровое изображение векторизуется с целью создания полноценной векторной карты региона проекта. Во втором варианте используется содержащаяся в панхроматических и многоспектральных (многозональных) космических снимках информация о текстуре и пространственном распределении спектральных свойств земной поверхности. Для тематического анализа космических изображений используются, как правило, алгоритмы классификации с обучающими выборками, то есть выборками тестовых участков поверхности с известными оптическими свойствами [2]. В этом варианте космические данные ДЗЗ служат самостоятельным объективным источником информации, влияющим на результаты проекта в целом.

Современный количественный анализ цифровых космических изображений городских агломераций – это совокупность методов количественной оценки геометрических, текстурных и яркостных характеристик пространственной структуры исследуемых объектов на земной поверхности. Методологическая сущность данных методов как основы формализации технологии получения знания о городских агломерациях заключается в том, чтобы придать сущности, формам, свойствам и характеристикам городских объектов внешнюю определённую, построить базу для количественного соизмерения и сопоставления их признаков. Как правило, это достигается путем выделения во всем объёме данных о городских объектах тех компонент, которые можно было представить и интерпретировать в строго формализованной математической форме (в виде чисел, математических формул или геометрических фигур и т.д.).

При разработке математических методов анализа данных о городских агломерациях, полученных в процессе дистанционного зондирования Земли, эта задача оказывается непростой, поскольку большая часть материала, собранного в результате дистанционного зондирования Земли по своей природе стохастична. Это происходит не только из-за ошибок измерения, отсутствия информации, неполноты знания законов природы, но и потому, что «многим природным и социальным явлениям внутренне присущи элементы стохастичности» [3]. Они, как правило, включают в свой состав множество разнородных элементов и подсистем. Это отражается в том, что многие данные дистанционного зондирования, например, материалы аэрокосмической съёмки высокого пространственного разрешения, обладают высокой степенью гетерогенности, то есть непостоянством свойств по полю изображения, что существенным образом осложняет задачу разработки эффективных математических методов обработки данных о городских агломерациях.

Сложность, случайность и гетерогенность объектов исследования, и, как следствие, данных дистанционного зондирования, являются основной причиной того, что большая часть математических методов, основанных на евклидовой или

линейной метриках, нашедших применение в урбанистике, оказываются малоэффективными или вовсе неэффективными при решении целого ряда задач градостроения. Выход из данной ситуации видится во всесторонних исследованиях методов и технологий, основанных на различных методологических основаниях и использующих разные пространственно-временные метрики, включая информационные и энтропийные, на предмет их применимости в целях решения градостроительных задач в рамках существующих и разрабатываемых систем дистанционного мониторинга городских объектов.

Целью данной статьи является представление результатов исследования особенностей пространственной структуры городских урбандолафтов и оценка их варибельности на территории мегаполиса по материалам космической съёмки Landsat [4]. При этом используются современные методы тематической обработки цифровых космических изображений городских агломераций: метод классификационного анализа, метод линеаментного анализа, метод мультифрактального анализа и метод оценки пространственной сложности и энтропии.

Объекты исследования

Ханой – столица Вьетнама – в силу своего стратегического положения в системе расселения и благоприятных природных условий являлся крупным политическим, торговым и культурным центром Севера Вьетнама.

Пространственная структура Ханоя в течение французского колониального периода (1884–1945) формировалась и развивалась в два этапа: на первом этапе (1884–1920) были построены первые архитектурные сооружения, ставшие основанием для пространственной структуры французского колониального Ханоя. На втором этапе (1920–1945) пространственная структура была дополнена принципом функционального зонирования с системой перпендикулярного пересечения улиц и французских архитектурных сооружений. Пространственная структура Ханоя периода социалистического строительства была разработана в соответствии с иерархической структурой. Она подвергалась влиянию принципа планирования, принятому в СССР. В этот период появились новые компоненты в городской структуре, такие как коллективное жильё, парки, концентрированные промышленные зоны. Государственная политика инноваций с появлением новых секторов экономики мотивировала городское развитие Ханоя. Многие новые городские районы и промышленные зоны наряду с крупномасштабными системами инфраструктуры значительно меняют пространственную структуру Ханоя. От моноцентрической радиальной структуры Ханой расширяется до структуры полицентрической, имеющей вид комплексной сети с городами-противовесами и городами-спутниками. В настоящее время Ханой – мегаполис, имеющий ярко выраженную неоднородную пространственную структуру [5; 6].

Для количественного анализа неоднородности пространственной структуры мегаполиса мы исследовали многозональные космические изображения Landsat трёх городских агломераций, расположенных на территории мегаполиса Ханой (рис. 1).

Первый объект : Dong Anh – один из семнадцати сельских уездов, входящих в состав Ханоя. Площадь – 277 кв. км. Уезд Dong Anh расположен к северу от центра Ханоя (один из четырёх сельских уездов левобережного Большого Ханоя). В розничной торговле всё ещё преобладают рынки и уличные торговцы, но их постепенно теснят крупные сетевые супермаркеты и торговые центры. В уезде имеется много мелких и средних предприятий по производству продуктов питания, стройматериалов, одежды и обуви, различных ремонтных мастерских и сервисных центров. Время образование данной городской агломерации – около 150 лет.

Второй объект: уезды Noai Duc, Tu Liem, Ha Dong, Quoc Oai. Площадь – 277 кв. км. Район расположен к западу от центра Ханоя. Торговля и сфера услуг составляют 46% ВВП уездов, аграрный сектор – 7,5%. В уезде имеется несколько промышленных зон, строятся высотные жилые комплексы, коттеджные посёлки и торговые центры. Тем не менее сохраняются и сельскохозяйственные уделы, где выращиваются рис, овощи, фрукты, цветы, домашняя птица и пресноводная рыба. Самая молодая городская агломерация, время её создания – около 50 лет.

Третий объект: центральный район мегаполиса Ханой, имеет большую плотность застроек, состоит из административных делений Hoan Kiem, Dong Da, Ba Dinh, Hai Ba Trung, Hoang Mai, Thanh Tri, Cau Giay. Площадь – 277 кв. км. Это наиболее старая часть мегаполиса, на которой располагается большое количество исторических застроек и памятников архитектуры.

Из представленных данных видно, что исходные космические изображения являются слабоконтрастными и распределение уровней серого тона этих изображений сильно отклоняются от нормального закона распределения. Поэтому

перед компьютерной визуализацией и вычислительной обработкой исходных космических изображений их целесообразно подвергнуть линейному контрастированию. Необходимо учитывать, что процедура контрастирования может повлиять на пространственные и спектральные характеристики исходных изображений. На рисунке 1 и в таблице 1 представлены преобразованные космические изображения городских агломераций и их статистические характеристики.

Из представленных в таблице 1 данных видно, что исходные космические изображения имеют высокие значения эксцесса и низкие значения контраста. Это указывает на отклонения закона распределения уровней серого тона в исследуемых изображениях от нормального закона распределения, что необходимо учитывать при дальнейшей тематической обработке.

Рассмотрим теоретико-методические основы и результаты применения вышеупомянутых автоматизированных методов количественного анализа цифровых космических изображений городских агломераций.

Классификационный анализ

Для классификационного анализа и интерпретации многозональных космических изображений наиболее широкое распространение получили программные комплексы ENVI, ArcGIS и eCognition [7–9], которые имеют хорошо развитый программный инструментарий для тематического дешифрирования цифровых изображений.

Таблица 1. Статистические характеристики фрагментов панхроматических изображений Landsat 8 городских агломераций, расположенных на территории мегаполиса Ханой

Объект	Среднее	Стандартное отклонение	Эксцесс	Асимметрия	Контраст
1	43,3	4,46	37,44	2,45	10,3
2	42,7	4,04	16,71	2,44	4,7
3	43,2	4,26	15,30	1,26	4,9

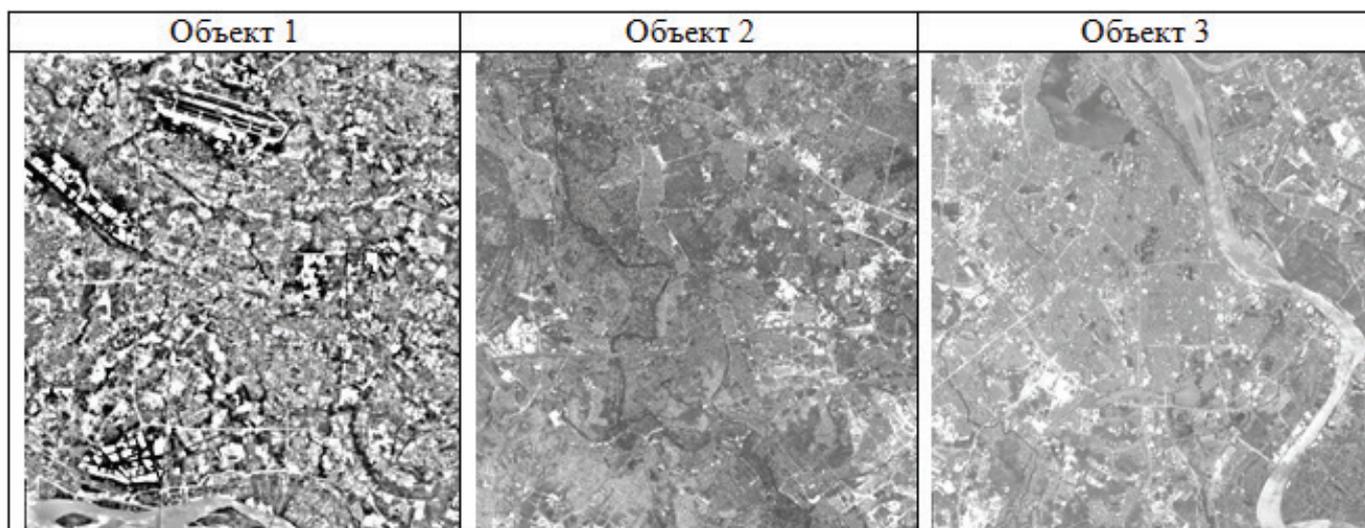
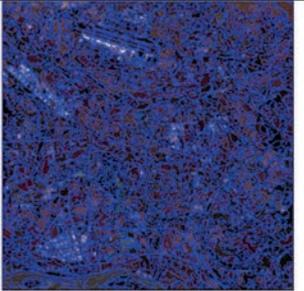
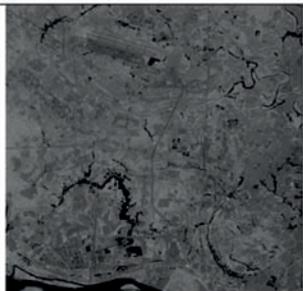
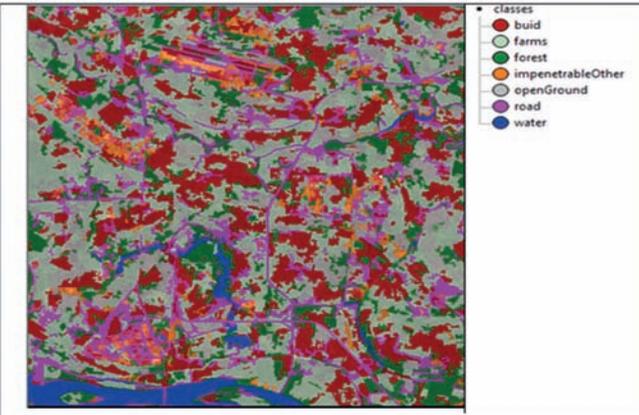


Рис. 1. Космические панхроматические изображения Landsat 8 исследуемых объектов

При выполнении автоматизированной классификации многозональных космических изображений Landsat 8 использовался метод объектно-ориентированной классификации (МООК) цифровых изображений [10]. В начале классификационного анализа мы проводим предварительную подготовку данных для последующей автоматизированной классификации многозонального изображения. Исходя, из поставленной задачи осуществляем выбор спектральных каналов съёмки, затем вырезаем из многозонального изображения соответствующие зональные изображения. В нашем случае были выбраны каналы: B2, B3, B4, B5 и B8. На следующем шаге классификационного анализа выполняется сегментация выбранных зональных изображений в программе eCognition. Алгоритм сегментации использует ряд входных параметров, значения которых выбираются в интерактивном режиме, ха-

Таблица 2. Пример результатов автоматизированной классификации многозонального изображения Landsat 8 района Dong Anh (Ханой)

	
Исходное изображение (канал B5)	Сегментированное изображение
	
Индексное изображение, рассчитанное по зональным изображениям B3 и B5	Спектральные сигнатуры для космического изображения
	
Результат объектно-ориентированной классификации многозонального космического изображения района Donganh	

рактически характеризующих текстурные особенности классифицируемых зональных изображений. Это – масштаб, форма (shape), цвет (color), компактность (compactness), гладкость (smoothness). Проведённые исследования показали, что наиболее подходящими для исследуемых изображений Landsat 8 являются следующие значения параметров: масштаб = 80, форма = 0,3 и компактность = 0,8, при этом качество проведённой сегментации является наиболее высоким. Далее, с целью выделения антропогенных и природных элементов в пространственной структуре города, мы использовали индексы: NDVI – нормализованный дифференциальный вегетационный индекс, и NDWI – модифицированный нормализованный дифференциальный водный индекс [11]. Эти индексы считаются наиболее устойчивыми к различным факторам: типу съёмочной аппаратуры, высоте Солнца, углу сканирования спутника, плотности атмосферы и др.

Пример индексного изображения, рассчитанного по зональным изображениям B3 и B5 для района Dong Anh (Ханой), приведён в таблице 2.

В процессе классификации изображений мы использовали набор решающих правил (Rule set), включающий в себя критерии отнесения, установленные таким образом, чтобы конкретный объект мог быть отделён от других объектов в классифицированном изображении. При этом мы использовали автоматический метод построения набора решающих правил. Метод заключается в том, что для каждого класса создают спектральную сигнатуру (signature), используемую для определения диапазона изменения значения дешифровочного признака для каждого класса объектов, представленных на изображении. Создание сигнатур проводится интерактивным методом. В таблице 2 представлены рассчитанные сигнатуры для космического изображения района Donganh.

Конечный результат объектно-ориентированной классификации многозонального космического изображения района Donganh представлен в последней строке таблицы 2.

На конечном этапе классификационного анализа картограмма классифицированного многозонального космического изображения была экспортирована в векторный файл и использована для вычисления площадей – составляющих урбандошфта городской агломерации. Эти вычислительные операции выполнялись в пакете Arcmap [12]. Значения площадей различных составляющих урбандошфта для трёх районов мегаполиса Ханой (Вьетнам), полученные по данным тематического дешифрирования многозональных космических изображений Landsat 8, приведены в таблице 3.

Таблица 3. Площади составляющих урбандошфта для различных городских агломераций, полученные при классификации космических изображений Landsat 8

	Зелёные насаждения, %	Растительный покров, %	Территории под застройки и дороги, %	Водное зеркало, %	Пустырь, %
Dong Anh	26,6	15,3	39,2	3,1	15,8
Hoai Duc	24,0	6,6	44,9 в обработке	8,3	16,2
Trung Tam	19,4	7,3	65,8	7,5	0

Оценка точности классификации элементов урболандшафта по многозональным космическим снимкам составила не менее 87%.

Классификационный анализ космических изображений может с успехом применяться для количественной оценки состояния, динамики и пространственной неоднородности различных элементов урболандшафта.

Линеаментный анализ

Автоматизированный метод пространственного анализа космических изображений, основанный на регистрации изменчивости систем штрихов и линеаментов на земной поверхности, является одним из перспективных космических методов мониторинга развития пространственной структуры городских агломераций. Как было отмечено многими исследователями, на космических изображениях могут обнаруживаться линейные структуры (линеаменты), отображающие разные по своему генезису и размерам объекты. Причём линеаменты антропогенного происхождения во многих случаях могут иметь более прямолинейную непрерывную форму и быть более контрастными по отношению к окружающим объектам. Указанное обстоятельство оказывается крайне полезным, когда целью обнаружения являются данные структуры. В таких случаях зачастую для обнаружения линейных структур на космических снимках бывает достаточно использовать универсальные алгоритмы построения контурных изображений с последующей процедурой поиска линейных участков контуров.

В зависимости от длины линеаментов, их выраженности и способа проявления в ландшафте, как правило, выделяют следующие классы [13]:

- малые линейные элементы ландшафта (первые десятки – сотни метров), выраженные на космоснимках тонкой штриховкой;
- крупные линейные элементы ландшафта (первые километры – первые десятки километров), дешифрирующиеся на космоснимках в виде прямых или почти прямых непрерывных однородных линий полосового или граничного характера;
- локальные линейные зоны (первые десятки километров – до 100 км). Эти структуры состоят из более мелких линейных элементов;
- региональные линейные зоны (сотни – первые тысячи километров и шириной десятки километров).

Однако в большинстве случаев целью линеаментного анализа космических изображений является выявление линейных структур природного происхождения, указывающих на геодинамические процессы, происходящие на или под поверхностью Земли. Данные процессы приводят к появлению на поверхности Земли структур, отображаемых на космических снимках кусочно-линейными структурами, линейные участки которых во многих случаях оказываются нестрогим прямолинейными. При количественном описании геодинамической активности на исследуемой территории

обычно используют поля сквозных или протяжённых линеаментов, получаемые при различных уровнях генерализации исходных космических изображений.

При исследовании пространственной структуры городских агломераций целью линеаментного анализа космических изображений является выявление линейных структур антропогенного происхождения, например: контурных границ застроенных территорий, автомобильных и железнодорожных дорог, каналов и др. Технология линеаментного анализа включает в себя следующие основные этапы: построение и предварительная обработка мозаики космических изображений, покрывающей исследуемую городскую агломерацию; формирование цифрового изображения штрихов – коротких (длиной от нескольких десятков до нескольких пикселей). Данный этап является одним из важнейших во всей технологии, поскольку формируемое на данном этапе изображение штрихов служит основой для дальнейшего обнаружения линеаментов. Одним из наиболее устойчивых и часто используемых алгоритмов построения поля штрихов является алгоритм, изложенный в работах А.А. Златопольского [14] и реализованный в компьютерной программе LESSA (Lineament Extraction and Statistical Analysis) [15]. Данный алгоритм относится к классу алгоритмов обнаружения контуров, использующих коэффициент совпадения с шаблоном. В нём для обнаружения штрихов на цифровом изображении используются следующие исходные параметры: набор масок (маски типа «Полоса» и типа «Прямолинейная граница»), пороговые значения параметров «линейность» L и «контрастность» ΔI . В данной работе мы использовали созданную нами программу «ГеоПК», позволяющую выявлять и анализировать не только линейные, но и кольцевые структуры [16].

Универсальной особенностью линеаментов является их объединение в системы, которые, как предполагается, тесно связаны с системой крупных линейных элементов городской пространственной структуры. Полученные в результате анализа схемы дешифрования линеаментов и розы-диаграммы (функции распределения линеаментов по азимутам простирания) могут использоваться специалистами в области градостроения и урбанистики для выявления особенностей городской пространственной структуры. Характеристики роз-диаграмм (плотность каждого направления розы, преобладающее направление вытянутости розы, среднее направление вытянутости розы, сходство розы с крестом) позволяют описать особенности их формы. Степень выраженности линеаментов на космических изображениях различна. Они, как правило, представляются на изображениях в виде узких чётких линий, либо формируют линейные зоны с внутренней структурой.

Ключевую роль при линеаментном анализе космических изображений играет порог выраженности линеаментов. Как правило, чем больше по величине порог, тем меньше штрихов отображаются на изображении, так как с увеличением значения порога отображаются только относительно крупные

линеаменты. Благодаря этому открывается возможность просматривать линеаменты разных иерархических уровней (от локальных до макрорегиональных и глобальных), отбирать их по направлению и степени выраженности.

На рисунке 2 представлено поле линементов, рассчитанное по панхроматическому космическому изображению Landsat 8 территории мегаполиса Ханой. Анализ поля линементов, приведенного на рисунке 2 совместно с данными, представленными в работах [17–19] показывает, что на территории мегаполиса Ханой прослеживается ряд крупных линементов:

1. Разлом реки Чаи, который соответствует глубинному разлому, расположенному в центральной части северного

Вьетнама и разделяющий его на две тектонические зоны: северо-восточную и юго-западную. Он также является основным разломом, разграничивающим Красную реку и реку Логам. В настоящее время движения по этому разлому продолжают, что приводит к деформации жилых зданий и земной поверхности. Так, например, вдоль этого разлома многие жилые дома были разрушены, а на обоих берегах реки Толич около моста То (район Хадонг) образовались огромные оползни [18];

2. Разлом Красной реки. Располагается в юго-западной части района, и на территории города Ханоя, этот разлом протягивается с берега реки Да до общин Хиеулык и Донгчук (уезд Куокоаи);

3. Разлом реки Ло. Располагается в северо-восточной части района. Простирается по направлению с северо-запада на юго-восток. Действия этого разлома: оползень – обвал на склоне гор в общине Намшон (уезд Шокшон). В настоящее время по результатам современных наблюдений тектонические движения по разлому реки Ло проявляются слабо.

4. Разлом Виньнинь располагается северо-восточнее разлома реки Чаи в центральной части северного Вьетнама и проходит через уезды Донгань и Тхьонгтин. Проявление тектонических движений по этому разлому наблюдается на поверхности земли в общине Вонгла (уезд Донгань). Результатом этих движений являются обвалы на левом берегу Красной реки, сложенном твёрдыми глинами Виньфук.

Кроме вышеуказанных основных разломов, можно перечислить ещё ряд других. В работах вьетнамских учёных показано, что действия этих разломов в настоящее время проявляется в виде слабых, нечётко выраженных сейсмических колебаний, которые происходят под доминирующим влиянием глубинных разломов на данной территории [19].

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод, что для территории мегаполиса Ханой характерно интенсивное проявление опасных инженерно-геологических процессов природного и техногенного характера, из-за чего страдает инфраструктура мегаполиса, происходят деформации жилых домов, общественных зданий и объектов, в том числе памятников архитектуры. Большая часть территории мегаполиса Ханой расположена в центральной погруженной зоне прогиба реки Красной, относящейся к чрезвычайно сложному тектоническому узлу – сгущению тектонических разломов различного порядка и простираения, в основном северо-западного, северо-восточного и субширотного, реже субмеридионального направлений, что необходимо учитывать при реконструкции существующей застройки и градостроительном планировании.

Линементный анализ может использоваться не только для изучения инженерно-геологических факторов региона, но и для количественного анализа и описания пространственной неоднородности урболандшафтов городских агломераций. Учитывая тот факт, что большинство элементов урболандшафтов имеют масштабы менее первых десятков метров,

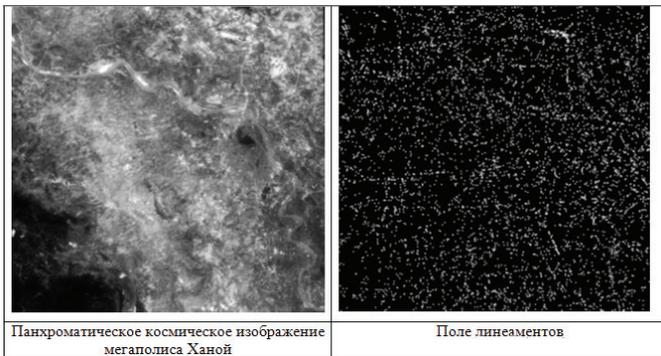


Рис. 2. Поле линементов, выделенных на панхроматическом изображении мегаполиса Ханой.

Объект	Поле штрихов	Поле линементов
1		
2		
3		

Рис. 3. Поля штрихов и линементов исследуемых космических изображений городских агломераций

можно предположить, что наибольшей информативностью для решения задач урбанистики будут обладать поля штрихов и их статистические характеристики, а не поля линеаментов. Анализ полей штрихов и линеаментов, рассчитанных по космическим изображениям трёх вышеописанных городских агломераций мегаполиса Ханой (рис. 3), выполненный с использованием программного пакета LESSA [13], показал правильность сделанных предположений.

Рассмотрим особенности полей штрихов исследуемых изображений городских агломераций. Первое, что можно отметить, это сложность визуального анализа данных полей в силу их высокой детальности. Количественный анализ этих полей можно выполнить с использованием характеристик полей, рассчитанных с помощью статистического анализа штрихов в программах LESSA, ГеоПК. В этом случае фактически изучается ориентационная характеристика рисунка (текстуры), то есть оценивается, как расположены штрихи определённого направления на изучаемой площади и как штрихи разных направлений соотносятся между собой. Соотношение штрихов разного направления в заданной окрестности (в скользящем окне) отображается розой-диаграммой. Можно получить розы-диаграммы и для областей произвольной формы, заданных пользователем. По результатам таких измерений строятся цветные изображения, которые показывают плотности штрихов различного направления и обобщённые характеристики роз-диаграмм, такие как степень вытянутости, крестообразность, отличие от окружающих и др. Эти изображения изучаются и интерпретируются пользователем, а также используются для автоматизированных процедур дешифрирования в ГИС. Результаты статистического анализа штрихов представляются и в графическом виде. Так, пользователь может получить рисунок всех роз-диаграмм, поле векторов, которые указывают направление и степень вытянутости роз-диаграмм, поле векторов максимального направления и др.

Анализ результатов статистической обработки полей штрихов показывает, что указанные статистические характеристики полей штрихов могут объективно описать различия и особенности пространственных структур исследуемых городских агломераций. Особо остановимся на информативности такой статистической характеристики, как плотность штрихов. Схемы изолиний плотности штрихов для различных городских агломераций, представленные в таблице 5, наглядно показывают, что схемы отличаются друг от друга по пространственной организации. Так, схема изолиний плотности штрихов для первого объекта имеет явно выраженную радиальную симметрию, в то время как для третьего объекта исследования характерна полицентрическая система пространственного распределения областей с высокой плотностью штрихов. Сравнение расположения мест локализации пикселей класса «застроенные территории и дорога» с локализацией пикселей, на которые приходится высокая плотность штрихов, показывает, что более чем в 80%

случаев их локализация совпадает, что указывает на высокую корреляцию между характеристиками «плотность штрихов» и «плотность застройки». Отсюда, из общих соображений, можно предположить, что должна существовать высокая корреляционная связь между характеристиками «плотность штрихов» и «плотность населения». Проверка данного пред-

Таблица 5. Результаты статистической обработки полей штрихов панхроматических космических изображений городских агломераций

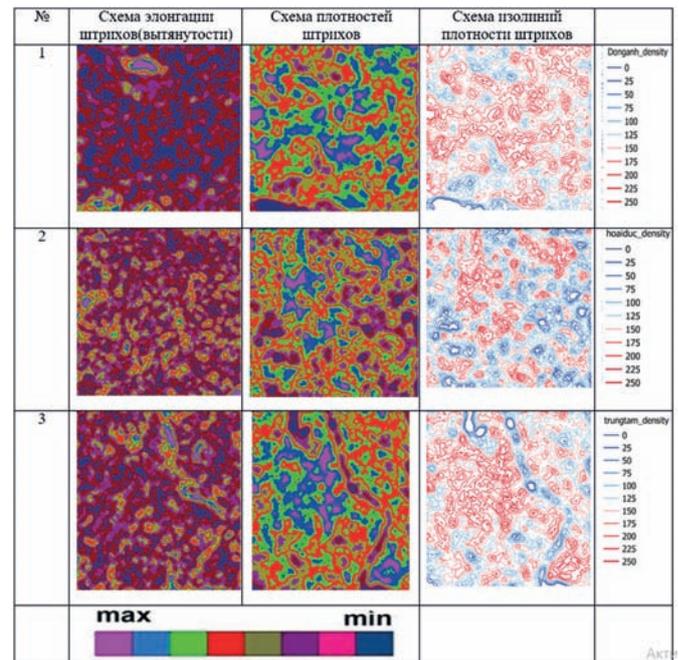


Таблица 6. Данные результатов вычисления значений характеристики «плотность штрихов» и сбора данных о плотности населения, собранных на сайтах интернета

Коммуна	Население	Площадь	Плотность населения	Плотности штрихов полученные в LESSA
cat que	13260	4,24	3127,358491	209,3
van canh	9642	4,49	2147,438753	127,5
dong quang	4170	3,83	1088,772846	124,2
khuong dinh	5929	1,39	4265,467626	207,3
bo de	16159	3,8	4252,368421	189,1
cu khoi	5652	4,87	1160,574949	137,9
yen so	10777	7,25	1486,482759	120,3
phu cuong	13231	8,99	1471,746385	147,6
vinh ngoc	12622	9,29	1358,665231	146,8
viet hung2	7884	3,83	2058,48564	165,5
kim chung	12453	3,44	3620,05814	132,8
dinh cong	-	-	5543	187
kim lan	-	-	1883	122
thach ban	-	-	2144	127
tan phu	5857	2,92	2005,821918	161
duc thuong	8398	5,27	1593,548387	115
cong hoa	-	-	1362	118
tien yen	5356	3,08	1738,961039	143
tram troi	4111	1,27	3237,007874	161
duong noi	-	-	2959	131
kim no	12272	6,56	1870,731707	143
co loa	16514	8,02	2059,102244	151
hai boi	16156	7,372	2191,53554	127

положения проводилась на основе данных о плотности населения коммун, проживающих на территории исследуемых городских агломераций, собранных на сайтах интернета [20].

Значение коэффициента линейной корреляции между характеристиками «плотность штрихов» и «плотность населения», вычисленное по выше представленным данным с 90-процентной достоверностью равно 0,567.

В заключение отметим, что проблема формирования и развития городских агломераций как специфических «форм территориального устройства» является одной из ключевых в современной российской градостроительной науке и практике [3]. В этой связи развитие дистанционных методов делимитации границ городских агломераций, а также их успешное применение могут оказаться стимулирующим фактором для успешного решения выше сформулированной проблемы применительно к специфике российского градостроительства. Сегодня для определения границ городских агломераций в статистических целях используется целый ряд методов: метод «реальной границы», метод делимитации границ на основании данных землепользования и плотности населения и другие. И, как показали результаты наших исследований, изложенные выше автоматизированные методы количественной обработки космических изображений, а именно, классификационный и линеаментный анализ, могут стать основой для практической реализации дистанционной маркировки территорий.

Литература

1. Пухова, М.М. Теоретические аспекты управления и развития городских агломераций / М.М. Пухова, С.И. Скобёлкина, А.В. Шатлыгина // Государственное и муниципальное управление в XXI веке: теория, методология и практика. – 2013. – № 9. – С. 8–12.
2. Чабан, Л.Н. Автоматизированная обработка аэрокосмической информации при картографировании геопространственных данных / Л.Н. – М. : МИИГАиК, 2013. – 106 с.
3. Монастырская, М.Е. Современные методы делимитации границ городских агломераций / М.Е. Монастырская, О.А. Песляк // Градостроительство и архитектура. – 2017. Т.7. – № 3. – С. 80–86. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.03.14.
3. Landsat 8. Satellite sensor. – Режим доступа: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/landsat-8/>
5. Чан Жанг Нам. Трансформация объемно-планировочной структуры Ханоя в первой половине 20 века / Чан Жанг Нам // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 3 (56). – С. 40–45.
6. Ха Дуи Ань. Генеральный план города Ханоя на 2010–2050 годы: особенности и перспективы реализации / Ха Дуи Ань // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 4. – С. 58–62.
7. Горбачёва, Е.Н. Программный комплекс ENVI — профессиональное решение для комплексной обработки мультиспектральных, гиперспектральных и радарных данных / Е.Н. Горбачева // Геоматика. – 2013. – № 2. – С. 50–52.
8. ArcGIS Desktop II: Инструменты и функциональность / Минобрнауки России. – М. : ESRI, 2009. – 484 с.
9. User Guide, eCognition Developer 8.7 Trimble Documentation – München, Germany, 2011. – Pp. 1273–1286.
10. Малинников, В.А. Методика обнаружения замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности по многозональным космическим изображениям SPOT: Апробация на территории Ханой (Вьетнам) / В.А. Малинников, Нгуен В.Н // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2017. – № 3. – С. 87–94.
11. Zha, Y. Use of Normalized Difference Built-Up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery / Zha Y., Gao J. and Ni S. // International Journal of Remote Sensing. – 2003. – № 24. – P. 583–594.
12. Грязнов, Г.И. Работа в среде геоинформационных систем. Часть 2. Работа в среде ArcGIS: Методические указания к циклу лабораторных / Г.И. Грязнов, Р.В. Ковин. – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – 26 с.
13. Златопольский, А.А. Особенности определения направления естественных объектов и текстур по растровым дистанционным данным / А.А. Златопольский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений : Сборник научных статей. – М. : ООО «Азбука2000», 2007. – Вып. 4. – Т. 1. – С. 52–56.
14. Златопольский, А.А. Ориентационно-текстурная характеристика аэрокосмических изображений / А.А. Златопольский // Цифровая обработка видеоинформации при структурно-геологических и сейсмоструктурных исследованиях. – Л. : ВСЕГЕИ, 1991. – С. 4–31.
15. Златопольский, А.А. Новые аспекты технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект // Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса. – 2011. – Т. 8. – № 3. – С. 38–46.
16. Разработка алгоритмов и программ линеаментного анализа цифровых изображений земной поверхности / Дм.В. Учаев, В.А. Малинников, Д.В. Учаев [и др.] // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2011. – № 1. – С. 67–73.
17. Ха Ван Хай. Отчет по результатам расшифровки самолетных фото в г. Ханое. Отчет-проект. Код проекта TC-DT/06-02-03. – Ханой: Изд-во Ханойского Горно-геологического государственного университета, 2004 (на вьетнамском языке).
18. Некоторые характеристики активно-тектонического разлома реки Красной / Као Динь Чьеу, Нгуен Хью Туен [и др.] // Горно-геологические науки. – 2006. – № 14. – С. 67–73.
19. Ха Ван Хай. Некоторые новые задачи тектонической активности в районе Ханое и его окрестностях / Ха Ван Хай // Геология. – 2007. – № 299. – С. 68–82.
20. https://vi.m.wikipedia.org/wiki/D%C6%B0%C6%A1ng_N%E1%BB%99i; https://vi.m.wikipedia.org/wiki/Kim_N%E1%BB%97

References

1. Puhova M.M., Skobèlkina S.I., SHatlygina A.V. Teoreticheskie aspekty upravleniya i razvitiya gorodskih aglomeratsij [Theoretical aspects of management and development of urban agglomerations]. *Gosudarstvennoe i munitsipal'noe upravlenie v XXI veke: teoriya, metodologiya i praktika* [State and Municipal Management in the KSHI Century: Theory, Methodology and Practice], 2013, no. 9, pp. 8–12.
2. CHaban L.N. Avtomatizirovannaya obrabotka aerokosmicheskoy informatsii pri kartografirovanii geoprostranstvennykh dannykh [Automated processing of aerospace information when mapping geospatial data]. Moscow, Publ. MIIGAiK, 2013, 106 p.
3. Monastyrskaya M.E., Peslyak O.A. Sovremennye metody delimitatsii granits gorodskih aglomeratsij [Modern methods for delimiting the boundaries of urban agglomerations]. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Town planning and architecture], 2017, T.7, no. 3, pp. 80–86. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.03.14.
3. Landsat 8. Satellite sensor. URL: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/landsat-8/>.
5. CHan ZHANG Nam. Transformatsiya ob'emno-planirovochnoj struktury Hanoya v pervoj polovine 20 veka [Transformation of the space-planning structure of Hanoi in the first half of the 20th century]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2016, no. 3 (56), pp. 40–45.
6. Ha Duj An'. General'nyj plan goroda Hanoya na 2010–2050 gody: osobennosti i perspektivy realizatsii [General Plan of the City of Hanoi for 2010–2050: Features and Prospects for Implementation]. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and Construction], 2010, no. 4, pp. 58–62.
7. Gorbacheva E.N. Programmnyj kompleks ENVI – professional'noe reshenie dlya kompleksnoj obrabotki mul'tispektral'nykh, giperspektral'nykh i radarnykh dannykh [The ENVI software package is a professional solution for complex processing of multispectral, hyperspectral and radar data]. *Geomatika* [Geomatics], 2013, no. 2, pp. 50–52.
8. ArcGIS Desktop II: Instrumenty i funktsional'nost' [ArcGIS Desktop II: Tools and Functionality]. Moscow, ESRI, 2009, 484 p.
9. User Guide, eCognition Developer 8.7 Trimble Documentation, München, Germany, 2011, pp. 1273 – 1286.
10. Malinnikov V.A., Nguen V.N. Metodika obnaruzheniya zameshheniya vidov zemlepol'zovaniya na vodonepronitsaemye poverhnosti po mnogoazonal'nym kosmicheskim izobrazheniyam SPOT: Aprbatsiya na territorii Hanoj (V'etnam) [Methods for detecting the substitution of land-use types on waterproof surfaces using multi-zone SPOT satellite images: Approbation on the territory of Hanoi (Vietnam)]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geodeziya i aerofotos'emka* [Proceedings of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography], 2017, no. 3, pp. 87–94.
11. Zha, Y., Gao, J. and Ni, S. (2003) Use of Normalized Difference Built-Up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, no. 24, pp. 583–594.
12. Gryaznov G.I., Kovin R.V. Rabota v srede geoinformatsionnykh sistem. CHast' 2. Rabota v srede ArcGIS. [Work in the environment of geographic information systems. Part 2. Working in the ArcGIS environment] : Metodicheskie ukazaniya k tsiklu laboratornykh rabot. Tomsk, Publ. TPU, 2010, 26 p.
13. Zlatopol'skij A.A. Osobennosti opredeleniya napravleniya estestvennykh ob'ektov i tekstur po rastrovym distantsionnym dannym [Features of determining the direction of natural objects and textures on raster remote data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: Fizicheskie osnovy, metody i tehnologii monitoringa okruzhayushhej sredy, potentsial'no opasnykh ob'ektov i yavlenij* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space: Physical principles, methods and technologies for monitoring the environment, potentially dangerous objects and phenomena] : Sbornik nauchnykh statej. Moscow, Publ. 000 «Azbukazh2000», 2007, Issue 4, T. 1, pp. 52–56.
14. Zlatopol'skij A.A. Orientatsionno-teksturnaya harakteristika aerokosmicheskikh izobrazhenij [Orientation-textural characteristics of aerospace images]. *TSifrovaya obrabotka videoinformatsii pri strukturno-geologicheskikh i sejsmotektonicheskikh issledovaniyakh* [Digital processing of video information during structural geological and seismotectonic studies]. Leningrad, VSEGEI, 1991, pp. 4–31.
15. Zlatopol'skij A.A. Novye aspekty tehnologii LESSA i analiz tsifrovoy modeli rel'efa. Metodicheskij aspekt [New aspects of LESSA technology and digital elevation model analysis. Methodical aspect]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing from space], 2011, T. 8, no. 3, pp. 38–46.
16. Uchaev Dm.V., Malinnikov V.A., Uchaev D.V., Fam Suan Hoan. Razrabotka algoritmov i programmlineamentnogo analiza tsifrovyykh izobrazhenij zemnoj poverhnosti [Development of algorithms and software for linear analysis of digital images of the earth's surface]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka* [News of universities. Geodesy and aerial photography], 2011, no. 1, pp. 67–73.
17. Ha Van Haj. Otchet po rezul'tatam rasshifrovki samoletnykh foto v g. Hanoj. Otchet-proekt. Kod proekta TC-DT/06-02-03 [Report on the results of the decoding aircraft photo in Hanoi. Report project. Project code TC-DT / 06-02-03]. Hanoj, Publ. Hanojskij Gorno-geologicheskij gosudarstvennyj universitet, 2004 (na v'etnamskomazyke).
18. Kao Din CH'eu, Nguen Hyu Tuen i dr. Nekotorye harakteristiki aktivno-tektonicheskogo razloma reki Krasnoj [Some characteristics of the active-tectonic fault of the Krasnaya River]. *Gorno-geologicheskije nauki* [Mining and Geology], 2006, no. 14, pp. 67–73.
19. Ha Van Haj. Nekotorye novye zadachi tektonicheskoy aktivnosti v rajone Hanoj i ego okrestnostyakh [Some new tectonic activity tasks in and around Hanoi]. *Geologiya* [Geology], 2007, no. 299, pp. 68–82.
20. URL: https://vi.m.wikipedia.org/wiki/D%C6%B0%C6%A1ng_N%E1%BB%99i; https://vi.m.wikipedia.org/wiki/Kim_N%E1%BB%97

Малинников Василий Александрович (Москва). Доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой космического мониторинга и экологии ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (105064, Москва, Гороховский пер., 4. МИИГАиК). Эл.почта: malinnikov@mail.ru.

Чан Тиен Ранг (Москва). Аспирант ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (105064, Москва, Гороховский пер., 4. МИИГАиК). Эл.почта: malinnikov@mail.ru.

Malinnikov Vasily Alexandrovich (Moscow). Doctor of Technical Sciences, Professor. Head of the Department of Space Monitoring and Ecology of the Moscow State University of Geodesy and Cartography (4 Gorokhovskylane, Moscow, 105064. MIIGAik). E-mail: malinnikov@mail.ru.

Chang Tien Rang (Moscow). Postgraduate student of the Moscow State University of Geodesy and Cartography (4 Gorokhovskylane, Moscow, 105064. MIIGAik). E-mail: malinnikov@mail.ru.