

Оценка спреда городских территорий Санкт-Петербурга на основе спутниковых изображений Landsat*

С. С. Лачининский^{1,2}, И. А. Логвинов^{1,3}, В. А. Васильева⁴

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Институт проблем региональной экономики РАН,
Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, ул. Серпуховская, 38

³ Институт территориального планирования «Урбаника»,
Российская Федерация, 191002, Санкт-Петербург, ул. Разъезжая, 5

⁴ ООО «Версус.Файнэнс»,
Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, пл. Труда, 2

Для цитирования: Лачининский, С. С., Логвинов, И. А., Васильева, В. А. (2023). Оценка спреда городских территорий Санкт-Петербурга на основе спутниковых изображений Landsat. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 68 (3), 471–489.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.303>

В контексте процессов урбанизации и территориального расширения городских территорий для обозначения «феномена пространственного роста городов» употребляется термин «urban sprawl» или «спрол» («расползание города»). Он представляет собой сложный географический процесс, который можно исследовать на основе современных данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ), включая использование мультиспектральных космических снимков проекта Landsat. В исследовании актуализирован процесс обработки и анализа снимков с использованием современных ГИС-комплексов. Представлена и апробирована методика дешифрирования, картографирования и расчета изменения динамики роста урбанизированных территорий для Санкт-Петербурга. Каждый снимок классифицирован с помощью машинного обучения по эталонам местности. Отдельно выделен класс урбанизированных территорий для каждого года анализа. В рамках проведенной работы была построена картосхема динамики городских территорий, а также количественно рассчитан прирост площади территорий за анализируемый период. В результате космические снимки проекта Landsat, полученные благодаря возможностям базы данных Геологической службы США, оказались достаточно эффективны для распознавания городских районов, водных объектов, неиспользуемых земель и растительного покрова. Апробация методики на примере Санкт-Петербурга позволила увидеть результаты расширения застроенной площади в периферийных (пригородных) зонах, в том числе за счет субурбанизации. За 25 лет урбанизированные зоны расширились в результате строительства инфраструктурных дорожных объектов и жилого строительства как малоэтажных проектов и ИЖС, так и крупных жилых комплексов. Дальнейшее развитие данного исследования будет включать контактную зону Ленинградской области в пределах Санкт-Петербургской городской агломерации.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-27-00084 «Пространственная и функциональная структура крупнейших городских агломераций России в условиях возросших геоэкономических рисков: новые подходы, инструментарий и рекомендации по совершенствованию»).

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2023

Ключевые слова: спрол, расползание, землепользование, агломерация Санкт-Петербурга, геоинформационные системы, спутниковые снимки, дистанционное зондирование, космические снимки Landsat, пространственное развитие города.

1. Введение и постановка проблемы

Города активно участвуют в преобразовании Земли за счет экстенсивного агломерационного развития, приводящего к их существенному разрастанию (это явление называют *urban sprawl* или спрол). Например, по оценке Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), площадь городских агломераций с численностью населения более 5 млн человек увеличилась за 25 лет (с 1990 по 2015 гг.) на 26 % — с 55.4 тыс. км² до 70.2 тыс. км² (Cities..., 2020; Лачининский и Логвинов, 2022).

Данные о пространственном развитии городов активно используются географами и региональными экономистами при создании моделей пространственной формы городских агломераций (Fujita and Ogawa, 1982) и периодизации процессов урбанизации (Geyer and Kontuly, 1993).

Разнообразные аспекты и проблемы пространственного развития городов раскрываются благодаря использованию современных данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ): к ним относятся «острова тепла» в городах, экологические нарушения, зеленые насаждения и их плотность, территориальное планирование и т. д. Особое внимание привлекают междисциплинарные темы, среди которых изучение роста городских территорий и изменения землепользования на них с применением самостоятельной классификации космоснимков и на основе проектов, в которых обработаны и соединены космоснимки в единый слой на весь мир (Лачининский и Логвинов, 2022).

О спроле опубликовано множество зарубежных и отечественных исследований, однако существует ряд подходов к определению этого феномена (Harvey and Clark 1965; Gottlieb, 1999; Johnson, 2001; Duany et al., 2001; Fulton et al., 2001; Li et al., 2013; Ewing, 1997; 2008; Ewing and Hamidi, 2014; Ewing et al., 2016; Gargiulo et al., 2012; Dadashpour and Salariyan, 2015; Perez et al., 2019; Дохов и Сеницын, 2020). Одни считают феномен разрастания города негативным явлением (Ewing, 2008; Ewing and Hamidi, 2014; Dadashpour and Salariyan, 2015), другие — позитивным или нейтральным (Gottlieb, 1999).

В одном из последних исследований, посвященном моделям постсоветской трансформации городов Восточной Германии и России (Gerten et al., 2022), указывается, что урбанизация часто приводит к потере плотности городской застройки в существующем фонде. Таким образом, модели землепользования на окраинах растущих городских районов существенно меняются.

В последние десятилетия расширение городов, вызванное ростом населения и увеличивающейся внутренней миграцией, привело к *росту жилищного строительства*, например в Московской агломерации (Kurichev and Kuricheva, 2018) или в региональных столицах, под влиянием миграционного прироста (Карачурина и др., 2021). Авторы (Дохов и Сеницын, 2020) считают, что спрол является следствием развития капиталистической экономики и воспринимается как инструмент стимулирования спроса, порожденный «глобальным капитализмом», что вполне

оправданно и логично, ведь именно в этой модели появился и развился земельный рынок и земельная рента.

Фактически земля традиционно рассматривается в географии (и это правильно!) как пространственный базис — основа географического понимания происходящих на территории социально-экономических процессов. Между тем земля может и должна пониматься как совокупность земельных участков — государственно организованной системы, позволяющей обеспечить достижение целей развития территории (Засядь-Волк, 2013).

Тем самым «глобальный капитализм» (т.е. крупные компании) получает возможность реализовывать гораздо больше товаров и услуг (Harvey and Clark, 1965).

Особый интерес связан с исследованиями глубинных *изменений пространственной структуры агломерации*, например Санкт-Петербургской, в том числе затрагивающих процессы локальной субурбанизации (Sechi et al., 2022; Лачининский и Сорокин, 2021; Zhitin et al., 2020; Li et al., 2020). Также отметим ряд публикаций, посвященных вопросам стратегического и территориального планирования агломерации (Ходачек, 2017; Лосин и Солодилов, 2020). В некоторых работах особое внимание уделяется специфике развития периферийной, контактной зоны агломерации (Свириденко, 2020). Отдельные вопросы трансформации городского пространства, в частности динамика и морфология районов массовой жилой застройки в постсоветском городе, были рассмотрены в статье (Аксенов и др., 2010). Концептуальную рамку формируют исследования в области изучения основных результатов и особенностей развития экономики Санкт-Петербурга в постсоветский период (Batchaev and Zhikharevich, 2014).

Пригородные зоны и усложнение пространственной структуры отдельных российских региональных столиц исследуются в (Дохов и др., 2020), а развитие пригородных зон крупнейших агломераций в (Браде и др., 2015). Влияние новейших негативных явлений, например пандемии COVID-19, на пригородные зоны проанализировано в работе московских географов (Махрова и Нефедова, 2021). Некоторые ученые (Дохов и Синицин, 2020; Johnson, 2001; Готтман, 2008) связывают спол с зонами субурбии, приравнивая это явление к расширению города за счет его распространения на сельские территории. В ряде публикаций (Fenglei et al., 2009; Huzui et al., 2013), включая данную статью, спол понимается как рост и расширение городов, без контекста преобразования сельской местности в городское пространство.

Однако спол сложен и неоднозначен не только в части определения, генезиса и динамики, но и в части количественного и качественного измерения этого феномена. В исследовании (Ismael, 2021) обзревается различные методы в оценке спрала. Отмечено, что важная проблема в разрастании городов связана со сложностью измерений и их сопоставлением. В настоящее время не существует единого подхода к измерению разрастания городских пространств. Наиболее распространенной методикой является измерение спрала через анализ плотности населения или по результатам переписи в изучаемых городских и прилегающих районах или с использованием скорости роста периметра городских земель (Ewing, 1997; 2008).

Существует довольно ограниченное количество исследований, в которых изучаются глобальные характеристики городского развития и разрастания городов, а также их последствия для достижения целей устойчивого развития (Bollens, 2005;

Franz et al., 2007; Feng, 2009; Schiavina et al., 2019). Эта проблема связана с трудностями из-за различий в применяемых данных, потому что разные страны имеют разные, не гармонизированные базы данных и показатели.

Заметную помощь в развитии методов количественной оценки спрота смог внести научно-технический прогресс и распространение пространственной (географической) информации, в том числе в виде многоканальных снимков местности со спутников. Исследование спрота вышло на новый уровень благодаря появлению и совершенствованию пространственных данных в сочетании с развитием ГИС и компьютерных технологий по их обработке. Новые технологии съемки со спутника сделали прорыв в изучении пространственных изменений территорий, появились исследования спрота с применением космоснимков (Huzui et al., 2013; Estoque and Yuji, 2015; Yi et al., 2018; Ying et al., 2017). Этот способ более удобен и нагляден, нежели градостроительные базы данных для развитых городов. Также он стал просто незаменимым для развивающихся территорий, где очень слабо ведется кадастровый учет (Schiavina et al. 2019). Поэтому исследование методов изучения спрота с помощью дистанционного зондирования является важной ступенью в развитии науки и контроле роста городов.

Что касается анализа роста городов, то технология дистанционного зондирования, особенно с учетом недавних улучшений, может обеспечить уникальный взгляд на процессы роста и изменения землепользования (Bhatta, 2012).

Наборы данных, полученные с помощью дистанционного зондирования постоянны во времени, охватывают большую часть поверхности планеты и предоставляют возможность сравнения разрастания городских территорий в любых точках мира. Это может позволить получать уникальные сопоставимые показатели для всех регионов Земли¹.

В представленной статье авторами поставлена проблема апробации и актуализации методики дешифрирования космических снимков и расчета изменения динамики роста урбанизированных территорий для Санкт-Петербурга с помощью элементов машинного обучения по эталонам местности.

2. Материалы и методика исследования

Исходные материалы, используемые в статье, опираются на оценку спрота Санкт-Петербурга по снимкам, принадлежащим Геологической службе США, которые были получены с помощью проекта Landsat в период с 1990 по 2015 г.

Санкт-Петербург представляет собой второй по численности населения город России с населением более 5.6 млн человек (2023). Городское ядро в границах Санкт-Петербурга, а также остальные районы Санкт-Петербурга и прилегающие к нему районы Ленинградской области формируют Санкт-Петербургскую агломерацию. В данной статье исследовательский акцент сделан на ключевой части агло-

¹ Возможность распознавания различных объектов, а также изучение их свойств дистанционными методами обусловлены тем, что поглощение, рассеивание, отражение и излучение электромагнитной энергии в различных зонах спектра специфичны для каждого типа земной поверхности и объектов, расположенных на ней (для гидрографии — одни, у зданий и дорог — другие, у растительного покрова — третьи).

мерации — городе федерального значения Санкт-Петербурге. Примеры рассмотрения агломерации в таких границах имеются в (Anokhin et al., 2017; Li et al., 2020).

Важным индикатором спрала на территории города является застройка разного назначения (жилые здания, производственные сооружения, хозяйственные строения, логистические или коммерческие объекты). Вместе с тем специфика передачи информации и особенности дешифрирования не дают возможности четко выделить здания по снимкам, прежде всего из-за низкого разрешения снимков и схожей отражательной способности зданий и дорог. Поэтому в предложенном исследовании мы фокусируемся на сплошной городской застройке как единой урбанизированной территории, включающей комплексные сплошные объекты (вместе с дорогами, инфраструктурными объектами и сооружениями). Данный подход схож с подходом к спролу в рамках концепции устойчивого развития, где в показателе 11.3.1 (соотношение темпов застройки и темпов роста населения) используется вся застройка города². В таком варианте спрол уже изучается командой проекта Global Human Settlement Layer (Melchiorri et al., 2019) и другими исследователями (Ghazaryan et al., 2021). Таким образом, исходим из того, что *урбанизированная территория в настоящем исследовании — это участок суши, занятый поселением селитебного типа и связанными с ним производственными, транспортными и инженерными сооружениями.*

Для анализа спрала города были использованы спутниковые снимки высокого разрешения Landsat-5 и Landsat-8 со стандартными радиометрическими и геометрическими поправками.

Целесообразность применения снимков для оценки динамики застраиваемых территорий обусловлена следующими факторами (Верещака и др., 1990):

- 1) объективностью (космический снимок способен объективно отражать состояние местности в каждый момент съемки);
- 2) актуальностью (материалы съемки со спутника можно получить на различные даты с разным разрешением);
- 3) масштабностью (современная съемка в обзорных масштабах позволяет одновременно снять огромные территории с довольно высокой детализацией);
- 4) экстерриториальностью (участки съемки не привязаны к государственным или административным границам);
- 5) доступностью (в настоящее время множество материалов космической съемки находится в свободном доступе).

Все это позволяет получать унифицированные данные по состоянию исследуемых территорий.

Для исследования было отобрано семь снимков с изображениями территории Санкт-Петербурга в разных спектральных каналах за разные годы: 1990, 1994, 2001, 2005 и 2011 гг. со спутника Landsat-5, 2015 г. — с Landsat-8. Лаг в промежутке в пять лет был нарушен из-за повышенной облачности в летний период для соответствующего года, поэтому снимки оказались непригодны для анализа и были заменены на снимки 1994 г. (вместо 1995 г.), 2001 г. (вместо 2000 г.) и 2011 г. (вместо 2010 г.).

Для устранения искажений снимков была проведена их радиометрическая и атмосферная коррекция. Коррекция производилась в свободно распространяе-

² United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) (1998). [online] Available at: <https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/Metadata-11-03-01.pdf>. [Accessed 01.03.2023].

мой программе по работе с картографическими данными QGIS. Радиометрическое преобразование было осуществлено для всех наборов снимков с помощью модуля I.Landsat.toar, в меню Image tools. Атмосферная коррекция снимков проводилась с помощью плагина Semi-Automatic Classification Plugin.

Для дешифрирования городской застройки используется множество методик, которые можно разделить на несколько видов, каждая из методик имеет свои преимущества и недостатки.

Первая — способ визуального дешифрирования с последующей векторизацией результатов (Артемьева и др., 2021). Данный способ характеризуется пониженной скоростью, а также наличием человеческого фактора, который имеет как минусы (пропуск объектов), так и плюсы (меньшая зависимость от качества обработки снимка в плане спектральных характеристик) при дешифрировании. При реализации другой методики используются такие индексы, как Urban Index (UI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) и Normalized Difference Built-up Index (NDBI) (Huzui et al., 2013; Estoque and Yuji, 2015; Ying et al., 2017), основанные на изменениях спектральных особенностей поглощения различных объектов. Данный метод характеризуется повышенной скоростью векторизации в отличие от визуального дешифрирования, а также зависимостью от качества обработки снимка (атмосферная, радиометрическая коррекция). Третий метод, наиболее современный и перспективный, основан на машинном обучении (Schiavina et al., 2019). За счет нейросетей удается учесть не только особенности расположения объектов, их формы и другие характеристики, на основе которых принимает свое решение исследователь при дешифрировании, но и спектральные характеристики объектов, а также иметь высокую скорость обработки данных. Именно метод, основанный на машинном обучении, был применен в данной работе. При этом важной особенностью авторского подхода является то, что использовалось бесплатное ПО QGIS (плагин Semi-Automatic Classification Plugin), а не платные ArcGIS и IDRISI.

Для обучения модели брались синтезированные изображения, а именно сочетания ближнего инфракрасного — красного и зеленого каналов (4-3-2 для Landsat-5 и 5-4-3 для Landsat-8), позволяющие выделить растительность красным цветом, а урбанизированные территории — голубым. Однако этот синтез не является идеальным в случае открытых почв и незасеянных грунтов.

Далее на основе составленных изображений, каждое из которых помогает определить разные виды объектов, проводилась классификация с машинным обучением по эталонам местности через плагин Semi-Automatic Classification Plugin. Все снимки воспринимаются машиной как набор пикселей, каждый из которых имеет разное значение цвета, в зависимости от разрешающей способности снимка — 15 или 30 квадратных метров пиксель.

В качестве основного метода классификации изображений выбран метод минимальных расстояний (Minimum Distance). Преимущество этого метода — четкое разграничение пикселей со сходными спектральными характеристикам.

Для анализа были выделены **четыре класса поверхностей** — городская застройка (урбанизированные территории), растительный покров, открытая почва, водные объекты. Распознаванию на снимках каждого класса предшествовал выбор эталонов и также избирательная верификация эталонных поверхностей на мест-

ности. Наилучшим вариантом выбора эталонов является сопоставление выделенной области пикселей с дешифрированием на местности. То есть в эталон обучения распознавания зданий по возможности не должны попадать соседние пиксели от иных, рядом расположенных объектов. Таким способом для каждого выделенного класса поверхности были отобраны эталоны на местности в разных частях исследуемой территории, для урбанизированных территорий — более 80 штук. Все эталоны сравнивались и выверялись по реальным объектам на картах Google, что позволило разработать качественные данные для дальнейшего обучения модели. В результате классификации (проводилась в программном обеспечении QGIS) были получены новые растровые слои, содержащие лишь значения четырех заданных типов объектов. Далее выполнялась векторизация растровых слоев, то есть они становились внемасштабными и пиксель заменялся значением на координатной плоскости. Из векторного слоя уже можно извлекать количественные значения каждого типа объектов — в нашем случае урбанизированных территорий. Это необходимо для дальнейшего построения картосхемы динамики городской застройки за период с 1990 по 2015 г. Площади урбанизированных территорий (векторизованные) рассчитываются при помощи калькулятора векторных слоев в атрибутивной таблице.

3. Результаты исследования и их обсуждение

По результатам исследования были составлены картосхемы за выбранные временные промежутки по четырем классам объектов (рис. 1–4). Классификация довольно точно определила пиксели по минимальному расстоянию, а также при наложении карты местности детально дешифрировала объекты³.

На картосхемах изображена территория Санкт-Петербурга по четырем классам объектов, по каждому из них можно сделать расчеты, определить динамику занятой площади и провести отдельное исследование. Из представленных был рассмотрен класс «Урбанизированная территория».

Центральное ядро города (Санкт-Петербург в нынешних административных границах), которое было заселено еще в XVIII–XIX вв., идентифицировано по снимкам почти сплошным пластом во всех периодах как урбанизированная территория, что неудивительно. Гораздо более наглядными представляются результаты, выходящие за рамки центральной части города. В табл. 1 приведена количественная оценка прироста площади урбанизированных территорий. В каждый из исследуемых периодов темпы прироста различны, поэтому ниже будет подробно рассмотрен каждый период и выявлены основные территории застройки и движущие силы.

После распада СССР массовое строительство типовых зданий и процесс расселения коммунальных квартир прекратились, а строительство в городе стало ограничиваться уплотнением и возведением элитных малоэтажных зданий. За период с 1990 по 1994 г. площадь урбанизированных территорий выросла на 8.7%

³ На снимках 2001 и 2005 гг. достаточно плохо дешифрирована застройка в Московском районе Санкт-Петербурга, что связано с углом падения солнца и падающей тенью от облака, которая совпадает по спектральным значениям с растительностью. Этот небольшой дефект для дальнейшего верного расчета площадей был устранен путем оцифровки участков вручную.

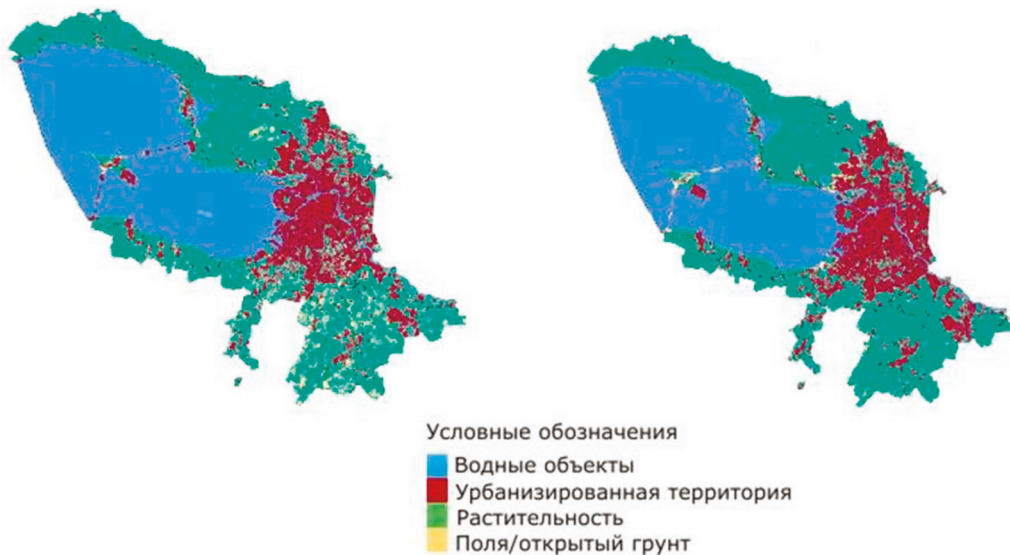


Рис. 1. Картограммы результатов классификации снимков за 1990 и 1994 гг. Рис. 1–4 составлены авторами на основе спутниковой информации

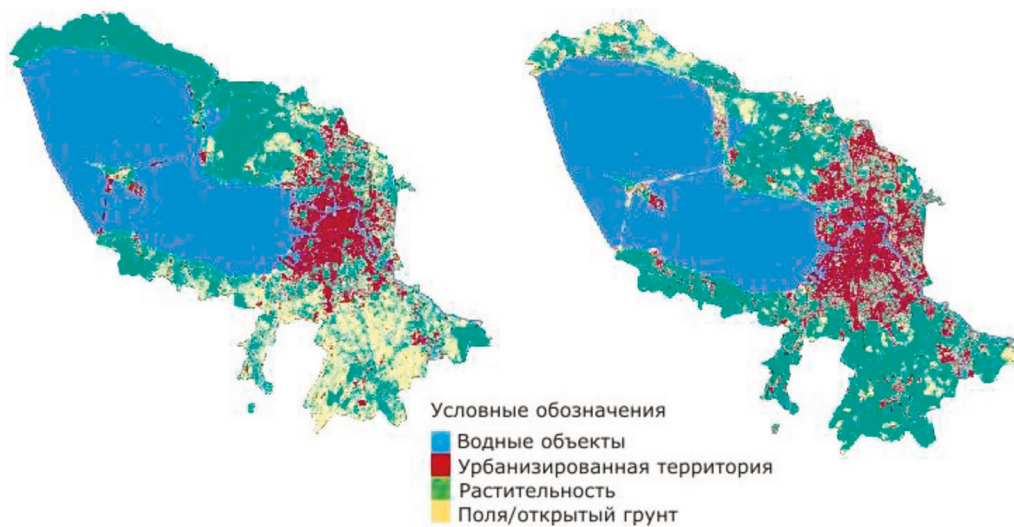


Рис. 2. Картограммы результатов классификации снимков за 2001 и 2005 гг.

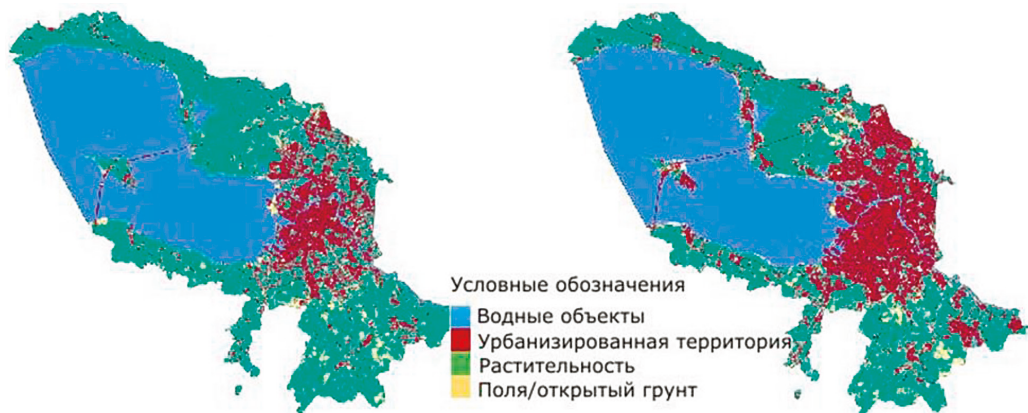


Рис. 3. Картограммы результатов классификации снимков за 2011 и 2015 гг.

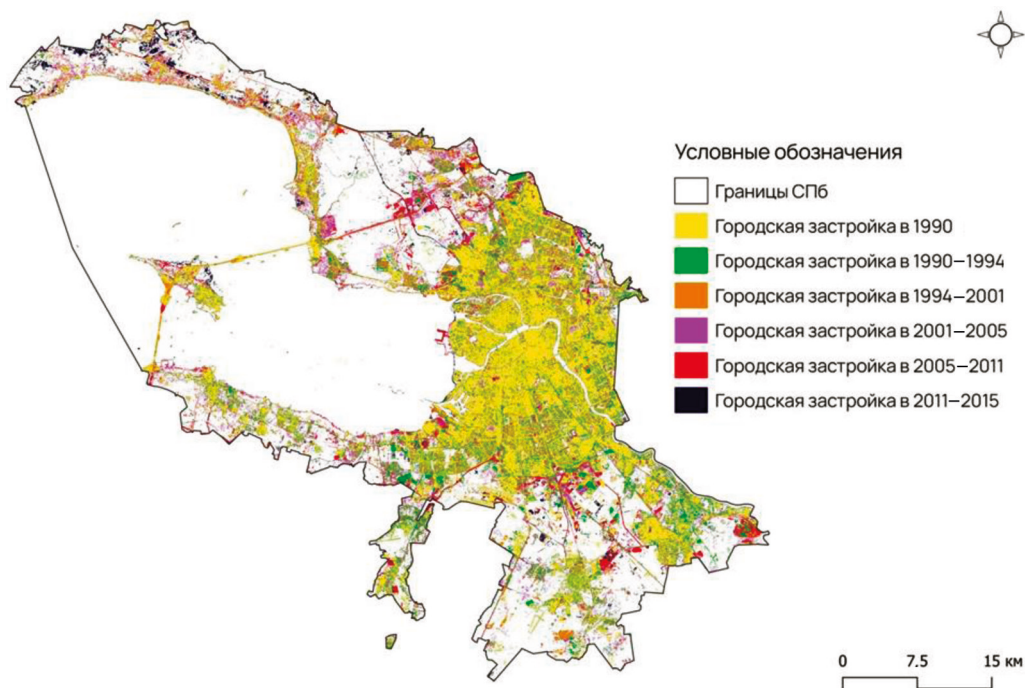


Рис. 4. Динамика изменения городской застройки за период с 1990 по 2015 г.

Таблица 1. Прирост площади урбанизированных территорий

Год	Площадь урбанизированных территорий, км ²	Прирост площади к предыдущему периоду, %
1990	401.037	–
1994	436.007	8.7
2001	455.46	4.5
2005	464.09	1.9
2011	494.93	6.5
2015	495.20	<1

Примечание. Рассчитано авторами на основе спутниковой информации⁴.

(табл. 1) за счет следующих объектов (список не исчерпывающий, но отражает наиболее крупные постройки):

- Левашово;
- Парголово;
- Новоселки;
- увеличение числа домов в с. Рыбацком;
- поселения вдоль р. Поповки;
- увеличение числа домов в Колпинском р-не;
- открытые автостоянки КАС «Володарская», «Волконская»;
- д. Сергиево.

В период с 1994 по 2001 г. в два раза снижается темп прироста урбанизированных территорий, согласно полученным по космоснимкам результатам (см. табл. 1)

- Парголово;
- Левашово;
- Новоселки;
- Северо-Западная ТЭЦ;
- территория вдоль ул. Коллонтай;
- Флагманская и Капитанская ул. на Васильевском о-ве;
- Гуммолосары;
- Угольная Гавань.

Процесс комплексного развития территорий, но уже частными компаниями, возобновился к началу 2000-х годов. Далее строительство новых жилых комплексов выполнялось частниками, а также росли зоны ближайшей субурбии. Период с 2001 по 2005 г. еще больше снижает темпы прироста урбанизированных территорий, всего 1.9% к предыдущему периоду (см. табл. 1). Рост произошел за счет следующих идентифицированных по картосхеме объектов:

- г. Зеленогорск (Курортный р-н);
- пос. Дюны;
- еще больше увеличилась площадь Левашова и Парголова;

⁴ Геологическая служба США (United States Geological Survey) (USGS). [online] Доступно на <https://www.usgs.gov/>. [Дата доступа 10.07.2022].

- пр. Авиаконструкторов;
- Александровка;
- Шушары;
- Детскосельский р-н.

Следующий исследуемый слой охватывает период с 2005 по 2011 г., темпы прироста урбанизированных зон поднялись до 6.5 %:

- Комарово;
- логопарк «Осиновая роща»;
- намыв набережной на Васильевском о-ве;
- Рубежное шоссе;
- логистический комплекс в Колпине;
- ЖК «Славянка»;
- логопарк «Мегалоджикс»;
- ЖК «Дудергофская линия»;
- завод по производству бытовой техники;
- ГСК-КГС-8;
- Жилгородок-15.

Последний исследуемый промежуток времени охватывает 2011–2015 гг., расчет площади не показал прироста урбанизированных территорий, за исключением роста ЖК «Славянка» и автодрома «Санкт-Петербург».

В ходе изучения роста урбанизированных территорий были выявлены общие тенденции, а именно увеличение застроенной площади в контактной зоне ядра и ближайшей контактной зоне (город-область), что говорит о наличии процессов субурбанизации, в том числе в пределах ядра (Санкт-Петербурга в административных границах). Вся полученная по результатам дешифрирования урбанизированная территория ядра обеспечивается развитой транспортной инфраструктурой города, что видно по ярко выраженным транспортным сетям. При сравнении Генерального плана и выделенных зон роста за исследуемые периоды не было выявлено явных противоречий. Производственные комплексы и логистические объекты расположены в функциональной зоне сооружений производственного, транспортно-логистического, складского назначения, объекты инженерной инфраструктуры с включением зданий общественно-деловой застройки связаны с обслуживанием данной территории. Зоны жилых комплексов совпадают с жилыми функциональными зонами Генплана. Таким образом, при мониторинге и дешифрировании снимков полезно подключать слои с официальной документальной информацией. Например, с помощью аэрофотоснимков можно отслеживать своевременность соблюдения проектов планировки территории, исследовать состояние почв и растительности вблизи проектируемых регионов.

Данное исследование, как уже упоминалось, затрагивает только ядро агломерации (Санкт-Петербурга в административных границах), поэтому вариантом дальнейшего развития темы является географическое расширение на всю территорию агломерации. Большая часть планов развития учитывает развитие агломерации и районов Ленинградской области, прилегающих к границам города. Согласно Концепции комплексного развития территорий Ленинградской области, прилегающих к границам Санкт-Петербурга, территория комплексного развития (ТКР) — это территория Ленинградской области в зоне активного социально-эко-

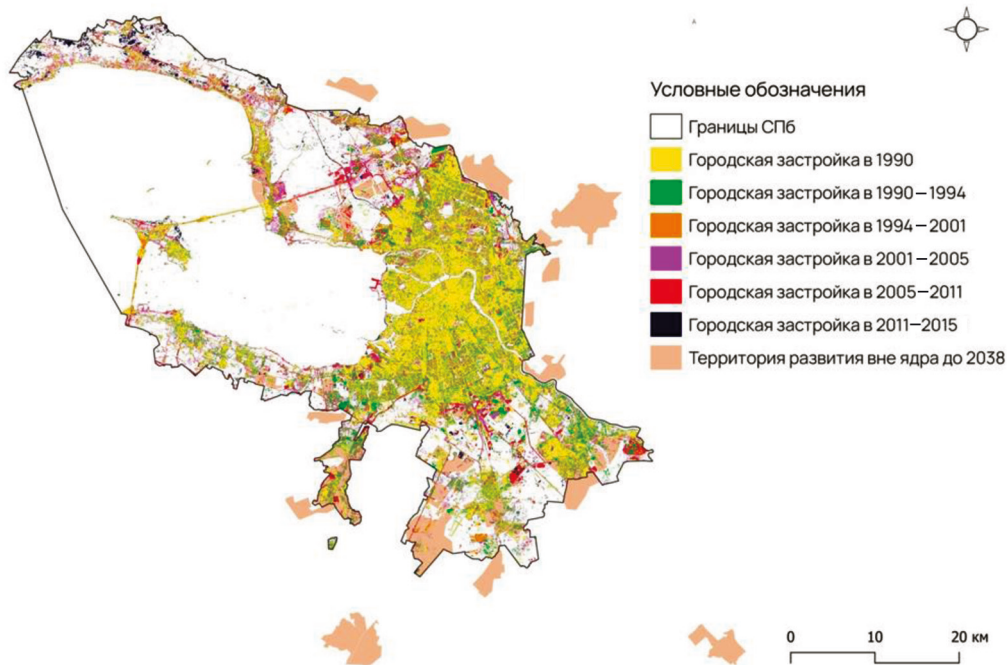


Рис 5. Территория развития города согласно стратегии до 2038 г. Составлено авторами

номического взаимодействия с городом Санкт-Петербургом (Овсеян, 2018). На долю территорий Ленинградской области, прилегающих к Санкт-Петербургу, приходится 30 % прироста населения Санкт-Петербургской агломерации, эта зона уже является местом жительства множества людей, чья жизнь тесно связана с городом. Поэтому важно отслеживать темпы и направления разрастания агломерации для дальнейшего создания качественных моделей пространственной формы агломерации, которые могли бы учитывать потребности населения для достижения транспортной доступности и комфорта жителей (рис. 5)⁵.

4. Заключение

В данном исследовании на основе инвентаризации существующих методик была предложена и апробирована дополненная методика количественной оценки спреала городских территорий и ее апробации на примере Санкт-Петербурга в его административных границах. Авторы рассмотрели понятие спреала как синоним расплзания и расширения, без контекста трансформации сельской местности. При этом исследовательский вектор был сфокусирован на сплошной городской застройке как единой урбанизированной территории, включающей комплексные сплошные объекты (вместе с дорогами, инфраструктурными объектами и сооружениями), что перекликается с подходами в рамках концепции устойчивого развития. Таким образом, урбанизированная территория в настоящем исследовании —

⁵ Рис. 5 составлен авторами на основе возможностей: <https://www.openstreetmap.org/#map=2/69.6/-74.9>. [Дата доступа 01.07.2022].

это участок суши, занятый поселением селитебного типа и связанными с ним производственными, транспортными и инженерными сооружениями.

Метод, основанный на машинном обучении, был применен в данной работе. Причем важной особенностью авторского подхода является то, что используется бесплатное ПО QGIS (плагин Semi-Automatic Classification Plugin), а не платные ArcGIS и IDRISI.

Была проведена количественная оценка прироста площади урбанизированных территорий за 1990–2015 гг., которая дала возможность выделить следующие тренды: за период с 1990 по 1994 г. площадь урбанизированных территорий города выросла на 8.7%; за период с 1994 по 2001 г. в два раза (к предыдущему периоду) снижаются темпы прироста урбанизированных территорий; за период с 2001 по 2005 г. еще больше снижаются темпы прироста урбанизированных территорий, всего 1.9% к предыдущему периоду; за период с 2005 по 2011 г. темпы прироста урбанизированных зон поднялись до 6.5% к предыдущему периоду. В результате изучения роста и расползания урбанизированных территорий Санкт-Петербурга были выявлены общие тенденции, а именно уплотнение урбанизированной зоны города, в том числе в прибрежной и курортной зонах, расширение территории городов-спутников в пределах административных границ, а также увеличение площади жилой застройки в периферийных зонах за счет активных процессов субурбанизации. Вся урбанизированная зона все теснее уплотняется, расширяется дорожная инфраструктура города, создавая новые полюсы притяжения экономической деятельности и девелоперских проектов.

В ходе исследования роста урбанизированных территорий Санкт-Петербурга были выявлены тенденции, связанные с увеличением застроенной площади в контактной зоне ядра и ближайшей контактной зоне (город-область), что говорит о наличии процессов субурбанизации, в том числе в пределах ядра (Санкт-Петербурга в административных границах).

Авторы сделали акцент на преимуществах и недостатках применяемой методики. Выявлено, что синтезированные изображения имеют четкие разграничения для урбанизированных и «зеленых» территорий, однако стоит очень внимательно относиться к определению эталонов на незасеянных грунтах. Для получения наиболее точных результатов в модели классификации необходимо четко разграничить эталоны для «голых» земель и для урбанизированных территорий.

Главным преимуществом применения данного метода является его универсальность и сравнимость для любых территорий Земли, чего нельзя сказать о проектной документации с разными метриками, языками. Разумеется, с развитием методов машинного обучения моделирование на основе классификации будет совершенствоваться и развиваться, что дает огромные возможности для дальнейшего развития и исследования на большем масштабе. Авторы считают методы и результаты данного исследования довольно перспективными и планируют продолжить их в масштабе всей Санкт-Петербургской агломерации.

Литература

Аксенов, К. Э., Брадэ, И., Рох, К. (2010). Социально-пространственная дифференциация в районах массовой жилой застройки Ленинграда — Санкт-Петербурга в постсоветское время. *Известия РАН. Серия географическая*, 1, 42–53.

- Артемьева, О. В., Бакулев, А. С., Данилова, О. И. (2021). Опыт создания карт динамики городской застройки по материалам данных дистанционного зондирования. *Современные проблемы географии*, 5, 7–12.
- Браде, И., Махрова, А. Г., Нефедова, Т. Г., Трейвиш, А. И. (2015). Особенности субурбанизации в Московской агломерации в постсоветский период. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 2, 19–29.
- Верещака, Т. В., Зверев, А. Т., Сладкопепцев, С. А., Судакова, С. С. (1990). *Визуальные методы дешифрирования*. М.: Недра.
- Готманн, Ж. (1965). Мегалополис или урбанизация северо-восточного побережья США. В: *География городов*. М.
- Дохов, Р. А. и Синицын, Н. А. (2020). Спрол в России: рост и структурная трансформация пригородов Белгорода. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 2, 191–206.
- Дохов, Р. А., Алов, И. Н., Шубина, Д. О., Волков, М. С., Мацур, В. А., Умнова, Т. Н., Шерстнева, А. Р. (2020). Пространственные структуры постсоциалистических пригородов: функциональные и социальные центры субурбии Махачкалы. *Городские исследования и практики*, 5 (4), 35–53. <https://doi.org/10.17323/usp54202035-53>
- Засядь-Волк, В. В. (2013). Земельные ресурсы как основа эффективного развития территории. *Вестник СПбГУ. Серия 7*, 2, 145–152.
- Карачурина, Л. Б., Мкртчян, Н. В., Петросян, А. Н. (2021). Пространственные особенности миграционного прироста пригородов региональных столиц России. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*, 6, 123–134.
- Лачининский, С. С. и Логвинов, И. А. (2022). Зарубежный опыт использования данных дистанционного зондирования Земли при изучении развития городов. *Псковский регионологический журнал*, 18 (3), 132–146. <https://doi.org/10.37490/S221979310021246-3>
- Лачининский, С. С. и Сорокин, И. С. (2021). Пространственная структура и особенности развития поселений Санкт-Петербургской агломерации. *Балтийский регион*, 13 (1), 48–69.
- Лосин, Л. А. и Солодилов, В. В. (2020). Стратегическое транспортное планирование развития Санкт-Петербургской городской агломерации. *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития*, 1 (60), 84–93.
- Махрова, А. Г. и Нефедова, Т. Г. (2021). Сможет ли пандемия COVID-19 стимулировать субурбанизацию в центральной России? *Вестник Московского университета. Серия 5. География*, 4, 104–115.
- Овсепян, М. В. (2018). Проблемы развития Санкт-Петербургской агломерации. *Проблемы развития территории*, 4 (96), 72–86.
- Свириденко, М. В. (2020). Пространственное развитие муниципальных образований Ленинградской области, находящихся в зоне интенсивной урбанизации Санкт-Петербургской агломерации: основные тенденции и вызовы. *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития*, 1 (60), 69–76.
- Ходачек, А. М. (2017). О Петербургской агломерации на основе концепции градостроительного развития. *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития*, 1 (53–54), 35–47.
- Anokhin, A. A., Lachininskii, S. S., Zhitin, D. V., Shendrik, A. V., Mezhevich, N. M., Krasnov, A. I. (2017). Post-Soviet Urban Environment: The Experience of St. Petersburg. *Regional Research of Russia*, 7 (3), 249–258.
- Batchaev, A. R. and Zhikharevich, B. S. (2014). Saint-Petersburg in the post-soviet time: economic strategies and development. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 4 (34), 68–83.
- Bhatta, B. (2012). *Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data*. New York: Springer Publ.
- Bollens, S. (2005). Urban growth boundary. In: R. W. Caves, ed., *Encyclopedia of the City*, Routledge (Taylor & Francis Group). NY, London.
- Cities in the World: A New Perspective on Urbanization* (2020). Paris: OECD Urban Studies.
- Duany, A., Plater-Zyberk, E., Speck, J. (2001). Suburban Nation. *The Rise of Sprawl and the Decline of the American Dream*. New York: North Point Press.
- Dadashpour, H. and Salariyan, F. (2015). Analyzing the impact of urban sprawl on land use changes in the region of Sari. *Geographical Studies of Urban Planning*, 3 (2), 145–163.
- Estoque, R. C. and Yuji, M. (2015) Classification and change detection of built-up lands from Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS imageries: A comparative assessment of various spectral indices. *Ecological Indicators*, 56, 205–217.

- Ewing, R. (1997). Is Los Angeles-style sprawl desirable? *Journal of the American Planning Association*, 63 (1), 107–126.
- Ewing, R. (2008). Characteristics, Causes, and Effects of Sprawl: A Literature Review. *Urban Ecology*, 519–535. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_34
- Ewing, R. and Hamidi, S. (2014). *Measuring Sprawl 2014. Smart Growth America*. 51. Available at: <https://smartgrowthamerica.org/wp-content/uploads/2016/08/measuring-sprawl-2014.pdf> [Accessed 10.01.2023].
- Ewing, R., Hamidi, S., Grace, J., Wei, Y. (2016). Does urban sprawl hold down upward mobility? *Landscape and Urban Planning*, 148 (1), 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.012>
- Feng, Li (2009). Applying remote sensing and GIS on monitoring and measuring urban sprawl. A case study of China *Revista Internacional Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 4, 47–56.
- Fenglei, F., Yunpeng, W., Maohui, Q., Zhishi, W. (2009). Evaluating the Temporal and Spatial Urban Expansion Patterns of Guangzhou from 1979 to 2003 by Remote Sensing and GIS Methods. *International Journal of Geographical Information Science*, 23 (11), 1371–1388. <https://doi.org/10.1080/13658810802443432>
- Franz, M. J., Van Wormer, J. J., Crain, A. L., Boucher, J. L., Histon, T., Caplan, W., Bowman, J. D., Pronk, N. P. (2007). Weight-loss outcomes: A systematic review and meta-analysis of weight-loss clinical trials with a minimum 1-year follow-up. *J Am Diet Assoc*. 107(10), 1755–1767. <https://doi.org/10.1016/j.jada.2007.07.017>
- Fujita, M. and Ogawa, H. (1982). Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configurations. *Regional Science and Urban Economics*, 12 (2), 161–196.
- Fulton, W., Pendall, R., Nguyen, M., Harrison, A. (2001). *Who sprawls most? How growth patterns differ across the U.S.* Washington: Brookings Institution.
- Gargiulo, V., Sateriano, A., Di, Bartolomei R., Salvati, L. (2012). Urban sprawl and the environment. *Geography, Environment, Sustainability*, 5 (4), 46–62. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2012-5-4-46-62>
- Gerten, C., Boyko, D., Fina, S. (2022). Patterns of Post-socialist Urban Development in Russia and Germany. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4, 846956. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.846956>
- Geyer, H. S. and Kontuly, T. A. (1993). Theoretical foundation for the concept of differential urbanization. *International Regional Science Review*, 15 (2). 157–177.
- Ghazaryan, G., Rienow, A., Oldenburg, C., Thonfeld, F., Trampnau, B., Stickel, S., Jürgens, C. (2021). Monitoring of Urban Sprawl and Densification Processes in Western Germany in the Light of SDG Indicator 11.3.1 Based on an Automated Retrospective Classification Approach. *Remote Sens*. 13, 1694. <https://doi.org/10.3390/rs13091694>.
- Gottlieb, P. D. (1999). Do economists have anything to contribute to the debate on urban sprawl? *Forum for Social Economics*, 28 (2), 51–64.
- Harvey, R. O. and Clark, W. A. V. (1965). The nature and economics of urban sprawl. *Land Economics*, 41 (1), 1–9.
- Huzui, A. I., Abdellaoui, A., Ileana, P.-S. (2013). Analysing urban dynamics using multi-temporal satellite images in the case of a mountain area, Sinaia (Romania). *International Journal of Digital Earth*, 6 (6), 563–579.
- Ismael, H. M. (2021). Urban form study: The sprawling city—review of methods of studying urban sprawl. *GeoJournal*, 86, 1785–1796. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10157-9>
- Johnson, M. (2001). Environmental impacts of urban sprawl: A survey of the literature and proposed research agenda. *Environment and Planning*, 33, 717–735.
- Kurichev, N. K. and Kuricheva, E. K. (2018). Relationship of housing construction in the Moscow urban agglomeration and migration to the metropolitan area. *Regional Research of Russia*, 8, 1–15.
- Li J., Li Ch., Zhu F. (2013). Spatiotemporal pattern of urbanization in Shanghai, China between 1989 and 2005. *Landscape ecology*, 28 (8), 1545–1565.
- Li, X., He, H. S., Xiu, C., Li, B., Shendrik, A. (2020). Twenty years of post-Soviet Union urban land use change of St. Petersburg. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 13 (4), 1019–1033.
- Melchiorri, M., Pesaresi, M., Florczyk, A. J., Corbane, C., Kemper, T. (2019). Principles and Applications of the Global Human Settlement Layer as Baseline for the Land Use Efficiency Indicator — SDG 11.3.1. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 8, 96. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020096>
- Perez, J., Fusco, G., Moriconi-Ebrard, F. (2019). Identification and quantification of urban space in India: Defining urban macro-structures. *Urban Studies*, 56 (10), 1988–2004.

- Sechi, G., Zhitin, D., Krisjane, Z., Berzins, M. (2022). Post-Soviet Suburbanization as Part of Broader Metropolitan Change: A Comparative Analysis of Saint Petersburg and Riga. *Sustainability*, 14, 8201. <https://doi.org/10.3390/su14138201>
- Schiavina, M., Melchiorri, M., Corbane, C., Florczyk, A. J., Freire, S., Pesaresi, M., Kemper, T. (2019). Multi-Scale Estimation of Land Use Efficiency (SDG 11.3.1) across 25 Years Using Global Open and Free Data. *Sustainability*, 11, 5674. <https://doi.org/10.3390/su11205674>
- Yi, H., Peng, D., Haowen, Y., Lifeng, Z., Shuwen, Y. (2018). Quantifying the main urban area expansion of Guangzhou using Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 39:21, 7693–7717. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1478465>
- Ying, S., Xinchang, Z., Yuan, Z. Qinchuan, X. (2017). Monitoring annual urbanization activities in Guangzhou using Landsat images (1987–2015). *International Journal of Remote Sensing*, 38:5, 1258–1276. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1268283>
- Zhitin, D. V., Lachininskii, S. S., Mikhaylov, A. A., Shendrik, A. V. (2020). Urban transformation of a post-soviet coastal city: the case of Saint-Petersburg. *Geography, Environment, Sustainability*, 13 (1), 145–158.
- Zhongchang, S., Sisi, Y., Huadong, G., Cuizhen, W., ZengXiang, Z., Ru, X. (2021). Assessing 40 years of spatial dynamics and patterns in megacities along the Belt and Road region using satellite imagery. *International Journal of Digital Earth*, 14:1, 71–87, <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1747560>

Статья поступила в редакцию 30 января 2023 г.
Статья рекомендована к печати 11 августа 2023 г.

Контактная информация:

Лачининский Станислав Сергеевич — st004020@spbu.ru
Лозвинов Илья Александрович — ilia.logwinov@yandex.ru
Васильева Влада Александровна — vlada_vas98@mail.ru

Assessment of urban sprawl of St. Petersburg urban areas based on Landsat satellite images*

S. S. Lachininskii^{1,2}, I. A. Logvinov^{1,3}, V. A. Vasileva⁴

¹ St. Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 190034, Russian Federation

² Institute of Regional Economy Problems of RAS,

38, ul. Serpukhovskaya, St. Petersburg, 190013, Russian Federation

³ Institute of Spatial Planning “Urbanika”,

5, ul. Razezzhaya, St. Petersburg, 191002, Russian Federation

⁴ Versus. Finance Limited Liability Company,

2, pl. Truda, St. Petersburg, 190000, Russian Federation

For citation: Lachininskii, S. S., Logvinov, I. A., Vasileva, V. A. (2023). Assessment of urban sprawl of St. Petersburg urban areas based on Landsat satellite images. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 68 (3), 471–489. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.303> (In Russian)

In the context of urbanization processes and the territorial expansion of urban areas, the term “urban sprawl” or “urban sprawl” is used to describe the “phenomenon of urban sprawl”. This is a complex geographical process, which can be investigated on the basis of modern remote sensing data, including the use of multispectral satellite images of the Landsat project. The

* The study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-27-00084 “The spatial and functional structure of the largest urban agglomerations of Russia in terms of increased geo-economic risks: new approaches, tools and recommendations for improvement”).

study actualized the process of processing and analysis of images using modern GIS complexes. As a result, the methodology of interpretation, mapping and calculation of changes in the dynamics of urbanized area growth for St. Petersburg was presented and tested. Each image was classified using machine learning by height standards. A class of urbanized areas was separately identified for each year of analysis. As part of this work, a map of the dynamics of urbanized territories over the study period was constructed, and the growth of the area of territories over the analysis period was quantitatively calculated. As a result, Landsat project space images, obtained due to the capabilities of the USGS database, turned out to be quite effective for detecting urban areas, water bodies, unused land and vegetation cover. Testing of the method on the example of St. Petersburg allowed seeing the results of expanding the built-up territory at the expense of peripheral (suburban) zones, including the effect of suburbanization. Over 25 years, urbanized areas have expanded due to the construction of infrastructure road facilities and housing construction of both low-rise projects and residential buildings, as well as large residential complexes. Further development of this study will include the Leningrad region contact area as part of the St. Petersburg urban agglomeration.

Keywords: sprawl, land use, St. Petersburg agglomeration, geoinformation systems, satellite images, remote sensing Landsat satellite images, spatial development of the city.

References

- Aksenov, K. E., Bradje I., Roh, K. (2010). Socio-spatial differentiation in Leningrad — St. Petersburg mass housing areas in the post-Soviet period. *Izvestiia RAN. Seriya geograficheskaya*, 1, 42–53. (In Russian)
- Anokhin, A. A., Lachininskii, S. S., Zhitin, D. V., Shendrik, A. V., Mezhevich, N. M., Krasnov, A. I. (2017). Post-Soviet Urban Environment: The Experience of St. Petersburg. *Regional Research of Russia*, 7 (3), 249–258.
- Artemeva, O. V., Bakulev, A. S., Danilova, O. I. (2021). Experience of creating maps of urban development dynamics based on remote sensing data. *Sovremennye problemy geografii*, 5, 7–12. (In Russian)
- Batchaev, A. R. and Zhikharevich, B. S. (2014). Saint-Petersburg in the post-soviet time: economic strategies and development. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 4 (34), 68–83.
- Bhatta, B. (2012). *Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data*. New York: Springer Publ.
- Bollens, S. (2005). Urban growth boundary. In: R. W. Caves, ed., *Encyclopedia of the City, Routledge (Taylor & Francis Group)*. NY, London. 475–476.
- Brade, I., Makhrova, A. G., Nefedova, T. G., Trejvish, A. I. (2015). Peculiarities of suburbanization in the Moscow agglomeration in the post-Soviet period. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2, 19–29. (In Russian)
- Cities in the World: A New Perspective on Urbanization* (2020). Paris: OECD Urban Studies, 171.
- Dadashpour, H. and Salariyan, F. (2015). Analyzing the impact of urban sprawl on land use changes in the region of Sari. *Geographical Studies of Urban Planning*, 3 (2), 145–163.
- Dohov, R. A. and Sinicyn, N. A. (2020). Sprawl in Russia: Growth and Structural Transformation of Belgorod's Suburbs. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2, 191–206. (In Russian)
- Dohov, R. A., Alov, I. N., Shubina, D. O., Volkov, M. S., Macur, V. A., Umnova, T. N., Sherstneva, A. R. (2020). Spatial Structures of Post-Socialist Suburbs: Functional and Social Centers of Makhachkala Suburbia. *Gorodskie issledovaniia i praktiki*, 5 (4), 35–53. <https://doi.org/10.17323/usp54202035-53> (In Russian)
- Duany, A., Plater-Zyberk, E., Speck, J. (2001). Suburban Nation. *The Rise of Sprawl and the Decline of the American Dream*. New York: North Point Press.
- Estoque, R. C. and Yuji, M. (2015). Classification and change detection of built-up lands from Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS imageries: A comparative assessment of various spectral indices. *Ecological Indicators*, 56, 205–217.
- Ewing, R. (1997). Is Los Angeles-style sprawl desirable? *Journal of the American Planning Association*, 63 (1), 107–126.
- Ewing, R. (2008). Characteristics, Causes, and Effects of Sprawl: A Literature Review. *Urban Ecology*. 519–535. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_34

- Ewing, R. and Hamidi, S. (2014). *Measuring Sprawl 2014. Smart Growth America*. Available at: <https://smart-growthamerica.org/wp-content/uploads/2016/08/measuring-sprawl-2014.pdf> [Accessed 10.01.2023].
- Ewing, R., Hamidi, S., Grace, J., Wei, Y. (2016). Does urban sprawl hold down upward mobility? *Landscape and Urban Planning*, 148 (1), 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.012>
- Feng, Li (2009). Applying remote sensing and GIS on monitoring and measuring urban sprawl. A case study of China. *Revista Internacional Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 4, 47–56.
- Fenglei, F., Yunpeng, W., Maohui, Q., Zhishi, W. (2009). Evaluating the Temporal and Spatial Urban Expansion Patterns of Guangzhou from 1979 to 2003 by Remote Sensing and GIS Methods. *International Journal of Geographical Information Science*, 23 (11), 1371–1388. <https://doi.org/10.1080/13658810802443432>
- Franz, M. J., Van Wormer, J. J., Crain, A. L., Boucher, J. L., Histon, T., Caplan, W., Bowman, J. D., Pronk, N. P. (2007). Weight-loss outcomes: A systematic review and meta-analysis of weight-loss clinical trials with a minimum 1-year follow-up. *J Am Diet Assoc*, 107 (10), 1755–1767. <https://doi.org/10.1016/j.jada.2007.07.017>
- Fujita, M. and Ogawa, H. (1982). Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configurations. *Regional Science and Urban Economics*, 12 (2), 161–196.
- Fulton, W., Pendall, R., Nguyen, M., Harrison, A. (2001). *Who sprawls most? How growth patterns differ across the U.S.* Washington: Brookings Institution.
- Gargiulo, V., Sateriano, A., Di, Bartolomei R., Salvati, L. (2012). Urban sprawl and the environment. *Geography, Environment, Sustainability*, 5 (4), 46–62. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2012-5-4-46-62>
- Gerten, C., Boyko, D., Fina, S. (2022). Patterns of Post-socialist Urban Development in Russia and Germany. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4, 846956. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.846956>
- Gotmann, J. (1965). Megalopolis or urbanization of the northeast coast of the United States. In: *Geography of cities*. Moscow. (In Russian)
- Geyer, H. S. and Kontuly, T. A. (1993). Theoretical foundation for the concept of differential urbanization. *International Regional Science Review*, 15 (2). 157–177.
- Ghazaryan, G., Rienow, A., Oldenburg, C., Thonfeld, F., Trampnau, B., Sticksel, S., Jürgens, C. (2021). Monitoring of Urban Sprawl and Densification Processes in Western Germany in the Light of SDG Indicator 11.3.1 Based on an Automated Retrospective Classification Approach. *Remote Sens*, 13, 1694. <https://doi.org/10.3390/rs13091694>
- Gottlieb, P. D. (1999). Do economists have anything to contribute to the debate on urban sprawl? *Forum for Social Economics*, 28 (2), 51–64.
- Harvey, R. O. and Clark, W. A. V. (1965). The nature and economics of urban sprawl. *Land Economics*, 41 (1), 1–9.
- Hovsepyan, M. V. (2018). Problems of development of St. Petersburg agglomeration. *Problems of territory development*, 4 (96), 72–86. (In Russian)
- Huzui, A. I., Abdellaoui, A., Ileana, P.-S. (2013). Analysing urban dynamics using multi-temporal satellite images in the case of a mountain area, Sinaia (Romania). *International Journal of Digital Earth*, 6 (6), 563–579.
- Ismael, H. M. (2021). Urban form study: The sprawling city—review of methods of studying urban sprawl. *GeoJournal*, 86, 1785–1796. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10157-9>
- Johnson, M. (2001). Environmental impacts of urban sprawl: A survey of the literature and proposed research agenda. *Environment and Planning*, 33, 717–735.
- Karachurina, L. B., Mkrtchyan, N. V., Petrosyan, A. N. (2021). Spatial peculiarities of migration growth of suburbs of regional capitals of Russia. *Vestnik of Moscow University. Series 5. Geography*, 6, 123–134. (In Russian)
- Khodacek, A. M. (2017). On St. Petersburg agglomeration based on the concept of urban development. *Ekonomika Severo-Zapada: Problemy i perspektivy razvitiia*, 1 (53–54), 35–47. (In Russian)
- Kurichev, N. K. and Kuricheva, E. K. (2018). Relationship of housing construction in the Moscow urban agglomeration and migration to the metropolitan area. *Regional Research of Russia*, 8, 1–15.
- Lachininskii, S. S. and Logvinov, I. A. (2022). Foreign experience of using Earth remote sensing data in the study of urban development. *Pskov Regionological Journal*, 18 (3), 132–146. (In Russian) <https://doi.org/10.37490/S221979310021246-3>
- Lachininskii, S. S. and Sorokin, I. S. (2021). Spatial structure and peculiarities of development of settlements of St. Petersburg agglomeration. *Baltic Region*, 13 (1), 48–69. (In Russian)

- Losin, L. A. and Solodilov, V. V. (2020). Strategic transportation planning for the development of St. Petersburg urban agglomeration. *Ekonomika Severo-Zapada: Problemy i perspektivy razvitiia*, 1 (60), 84–93. (In Russian)
- Li J., Li Ch., Zhu F. (2013). Spatiotemporal pattern of urbanization in Shanghai, China between 1989 and 2005. *Landscape ecology*, 28 (8), 1545–1565.
- Li, X., He, H. S., Xiu, C., Li, B., Shendrik, A. (2020). Twenty years of post-Soviet Union urban land use change of St. Petersburg. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 13 (4), 1019–1033.
- Makhrova, A. G. and Nefedova, T. G. (2021). Can the COVID-19 pandemic stimulate suburbanization in central Russia? *Vestnik of Moscow University. Series 5. Geography*, 4, 104–115. (In Russian)
- Melchiorri, M., Pesaresi, M., Florczyk, A. J., Corbane, C., Kemper, T. (2019). Principles and Applications of the Global Human Settlement Layer as Baseline for the Land Use Efficiency Indicator — SDG 11.3.1. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 8, 96. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020096>
- Perez, J., Fusco, G., Moriconi-Ebrard, F. (2019). Identification and quantification of urban space in India: Defining urban macro-structures. *Urban Studies*, 56 (10), 1988–2004.
- Sechi, G., Zhitin, D., Krisjane, Z., Berzins, M. (2022). Post-Soviet Suburbanization as Part of Broader Metropolitan Change: A Comparative Analysis of Saint Petersburg and Riga. *Sustainability*, 14, 8201. <https://doi.org/10.3390/su14138201>
- Schiavina, M., Melchiorri, M., Corbane, C., Florczyk, A. J., Freire, S., Pesaresi, M., Kemper, T. (2019). Multi-Scale Estimation of Land Use Efficiency (SDG 11.3.1) across 25 Years Using Global Open and Free Data. *Sustainability*, 11, 5674. <https://doi.org/10.3390/su11205674>
- Sviridenko, M. V. (2020). Spatial development of municipalities of the Leningrad region located in the zone of intensive urbanization of the St. Petersburg agglomeration: main trends and challenges. *Economy of the North-West: problems and prospects of development*, 1 (60), 69–76. (In Russian)
- Yi, H., Peng, D., Haowen, Y., Lifeng, Z., Shuwen, Y. (2018). Quantifying the main urban area expansion of Guangzhou using Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 39:21, 7693–7717. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1478465>
- Ying, S., Xinchang, Z., Yuan, Z., Qinchuan, X. (2017). Monitoring annual urbanization activities in Guangzhou using Landsat images (1987–2015). *International Journal of Remote Sensing*, 38:5, 1258–1276. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1268283>
- Vereshchaka, T. V., Zverev, A. T., Sladkoptev, S. A., Sudakova, S. S. (1990). *Visual methods of interpretation*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Zasyad-Volk, V. V. (2013). Land resources as the basis for effective development of the territory. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 7, 2*, 145–152. (In Russian)
- Zhitin, D. V., Lachininskii, S. S., Mikhaylov, A. A., Shendrik, A. V. (2020). Urban transformation of a post-soviet coastal city: the case of Saint-Petersburg. *Geography, Environment, Sustainability*, 13 (1), 145–158.
- Zhongchang, S., Sisi, Y., Huadong, G., Cuizhen, W., ZengXiang, Z., Ru, X. (2021). Assessing 40 years of spatial dynamics and patterns in megacities along the Belt and Road region using satellite imagery. *International Journal of Digital Earth*, 14:1, 71–87. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1747560>

Received: January 30, 2023

Accepted: August 11, 2023

Authors' information:

Stanislav S. Lachininskii — st004020@spbu.ru

Ilya A. Logvinov — ilia.logwinov@yandex.ru

Vlada A. Vasileva — vlada_vas98@mail.ru