

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Государственный университет по землеустройству»
(ГУЗ)

На правах рукописи

Бегляров Никита Сергеевич



Разработка методики сбора трехмерных кадастровых данных
объектов недвижимости на урбанизированных территориях

25.00.26 – Землеустройство, кадастр и мониторинг земель

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Шаповалов Дмитрий Анатольевич

Москва – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ И РАЗВИТИЯ 3D-КАДАСТРА, ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	11
1.1 Предпосылки выбора направления исследований.....	11
1.2 Современное состояние области трехмерных систем управления земельными ресурсами (3DLAS) в рамках концепции «умный город».....	19
Выводы по первому разделу	43
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ТРЕХМЕРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ	45
2.1 Исследование форматов LADM, CityGML, IFC и возможности их взаимодействия для 3D-моделирования городского пространства.....	45
2.2 Исследование и выработка классификации объектов недвижимости для представления в 3D-кадастре и 3DLAS	64
2.3 Анализ вектора развития в сфере управления земельными ресурсами на урбанизированных территориях в Российской Федерации.....	71
Выводы по второму разделу	83
3. МЕТОДИКИ И ТЕХНОЛОГИИ СБОРА ТРЕХМЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ 3D-КАДАСТРА И 3DLAS.....	88
3.1 Сравнительный анализ существующих геодезических подходов к сбору трехмерной информации	88
3.2 Разработка методики моделирования урбанизированных пространств	95
3.3 Применение методики для сбора трехмерных кадастровых данных в парадигме «умного города»	129
Выводы по третьему разделу	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	153
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	155
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА МЕТО- ДИКИ СБОРА И ОБРАБОТКИ ТРЕХ- МЕРНЫХ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕДВИЖИМОСТИ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ...	187

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Разворачиваемые все шире национальные программы и отраслевые проекты по цифровизации государственных сервисов и услуг опираются на возрастающий общественный запрос в модернизации и повышении эффективности управления и учета во всех сферах. Особенным значением в данном вопросе обладают территории высокой инфраструктурной и экономической активности, в общем виде – это урбанизированные пространства городов и городских агломераций, которые притягивают большинство людей, капитала и обретают политическую субъектность. Начиная с 2012 г. в Российской Федерации (РФ) разрабатывают и принимают пакеты нормативно-правовых документов в области государственного кадастрового учета и регистрации прав на недвижимое имущество с целью интеграции международного опыта управления земельными ресурсами и объектами недвижимости с учетом изменяющейся роли городов в общей схеме хозяйствования.

Существующий международный опыт цифровизации в области решения указанных задач предполагает переход на трехмерное пространственное представление объектов недвижимости и юридических границ, возникающих в реальном мире, что одновременно поднимает значительный пласт технических, юридических, кадровых и экономических вопросов. Трехмерный подход к представлению урбанизированных территорий рассматривается как фундаментальный базис для развития полномасштабного цифрового государства, решения существующих проблем учета и представления сложных объектов недвижимости (в том числе многоэтажных зданий с пересекающимися конфигурациями, мостов, инженерных коммуникаций, подземных сооружений), пересечений их прав ввиду расположения на разных уровнях (подземный, наземный, надземный), а также вопросов экологического мониторинга и эффективного управления территориями.

Проведение пилотного проекта 3D-кадастра в России наглядно продемонстрировало законодательную возможность учета трехмерных моделей объектов недвижимости (3D-моделей) в Едином государственном реестре недвижимости (ЕГРН).

Развитие государственной политики по внедрению в области строительства информационного трехмерного моделирования зданий (BIM-технологии) и начало разработки концепции «умный город» при управлении урбанизированными территориями, а также мышление в формате полного жизненного цикла объекта благоприятствует переходу на 3D-кадастр в России.

Однако на пути имплементации международного опыта в отечественную практику стоит проблема, связанная с отсутствием соответствующего научно-методического обоснования и технических рекомендаций для выполнения кадастровых работ по трехмерному моделированию объектов недвижимости.

Для исключения сложившейся проблемы проведено исследование, направленное на обоснование выбора методики геодезических измерений и расчета оптимальных параметров сбора трехмерных пространственных данных на урбанизированных территориях в целях трехмерного кадастра и эффективного управления территориями в парадигме «умного города».

Таким образом, тема диссертационного исследования «Разработка методики сбора трехмерных кадастровых данных объектов недвижимости на урбанизированных территориях» является своевременной и актуальной.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в изучение отдельных аспектов 3D-кадастра РФ и трехмерного моделирования объектов внесли следующие российские ученые: Варламов А. А., Волков С. Н., Гальченко С. А., Карпик А. П., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Лисицкий Д. В., Басова И. А., Сизов А. П., Аврунев Е. И., Алтынцев М. А., Тикунов В. С., Цветков В. Я., Шаповалов Д. А., Папаскири Т. В., Иванов А. И., Мазалов В. П., Юнусов А. Г., Вандышева Н. В. и др.

Среди зарубежных ученых можно выделить Van Oosterom P., Stoter J., Lemmen C., Zlatanova S., Larsson K., Ploeger H., Kitsakis D. (Нидерланды), Paulsson J. (Швеция), Thompson R., Rajabifard A. (Австралия), Господинова С. Г., Kostov G. P. (Болгария), Li L., Ying S. (Китай), Khoo V. (Малайзия), Jdeed A. D. (Сирия), Doner F. (Турция), чьи работы затрагивают множество вопросов, в особенности уделяя внимание концептуальной организации 3D-кадастра, его геоинфор-

мационному представлению, юридическому и техническому синтезу с учетом юрисдикций своих стран, а также посвящены проектам технической реализации перехода к трехмерной системе учета и регистрации объектов недвижимости.

В результате аналитического обзора отечественного и международного опыта и публикаций выявлены основные тренды научных исследований в области 3D-кадастра, что позволило сделать следующие выводы о степени разработанности проблематики:

– по состоянию на 2021 г. в не менее чем 30 странах мира, в том числе и в России, проводятся исследования и выполняются пилотные проекты по 3D-кадастру. При этом полностью функционирующей системы трехмерного кадастра нет ни в одной стране, хотя наиболее прогрессивными в этой области являются Нидерланды и Китай. По заявлению специальной группы по 3D-кадастру Международной федерации геодезистов (FIG) во всех существующих системах на данный момент присутствует какое-либо ограничение функциональности или даже ряд сложностей при учете и регистрации трехмерного представления объектов недвижимости, однако это не исключает возможность адаптации успешного международного опыта и разработок для отечественной системы ЕГРН;

– по состоянию на 2021 г. анализ публикационной активности показал, что наибольшие усилия исследователей сконцентрированы на вопросах пространственного моделирования зданий (BIM) и организации интероперабельности между форматами представления трехмерных данных из разных источников;

– разработано и описано несколько различных подходов к моделированию объектов недвижимости с разным уровнем детализации, по разным исходным данным, что привело к созданию различных технологических цепочек и низкой согласованности данных;

– исследования подходов к представлению данных на большие урбанизированные территории через форматы CityGML имеют догоняющий характер, поскольку еще не вошли в практику так же широко, как BIM-технологии;

– опубликованный опыт отечественных ученых и исследователей в большей степени утилизирует материалы пилотного российско-нидерландского проекта по

созданию 3D-кадастра в РФ (2010–2012 гг.), а более поздние работы концентрируются на решении задач моделирования конкретных единичных объектов без выработки общего подхода к задаче создания трехмерных моделей для целей ЕГРН.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что вопрос методического обоснования и выбора геодезической технологии формирования 3D-моделей для трехмерного кадастра в России не получил достаточного освещения в отечественной литературе и требует проведения исследований с учетом успешного зарубежного опыта.

Цель и задачи исследования. Целью настоящего диссертационного исследования является разработка технологической схемы геодезического обеспечения моделирования объектов недвижимости (ОН) на урбанизированных территориях для 3D-кадастра и управления урбанизированными территориями в парадигме «умного города».

Основные задачи диссертационного исследования:

– выполнить анализ наиболее широко применяемых подходов к созданию трехмерных моделей объектов недвижимости для 3D-кадастра в России и за рубежом и исследование широко применяемых форматов трехмерных данных для представления пространственных моделей в 3D-кадастре в международной практике;

– разработать методику расчета оптимальных параметров сбора трехмерных пространственных данных при моделировании объектов недвижимости для задач трехмерного кадастра ОН и управления урбанизированными территориями в парадигме «умного города»;

– разработать технологическую схему геодезических работ при моделировании ОН для задач 3D-кадастра и «умного города»;

– провести апробацию разработанной методики на объектах недвижимости, предлагаемых для моделирования в 3D-кадастре с соблюдением текущих точностных требований выполнения кадастровых работ для внесения информации в ЕГРН.

Объект исследования. Объектом исследования является геодезическое обеспечение трехмерного кадастра объектов недвижимости и городского управления в парадигме «умного города».

Предмет исследования. Предметом исследования является методика геодезических работ по созданию 3D-моделей объектов недвижимости на урбанизированных территориях для целей трехмерного кадастра и эффективного управления.

Научная новизна работы:

– предложен новый подход к моделированию объектов недвижимости на основе объединения гетерогенных облаков точек из результатов аэрофотосъемки и лазерного сканирования для задач 3D-кадастра и эффективного управления урбанизированными территориями с сохранением точностных и детализационных параметров;

– предложена дифференциация существующих видов ОН на категории для моделирования под задачи 3D-кадастра и введение в строительные нормы и правила по информационному моделированию зданий кадастрового уровня представления 3D-модели;

– разработан, исследован и обоснован алгоритм расчета оптимальных параметров для создания 3D-моделей и поэтапной обработки трехмерных пространственных данных из гетерогенных источников информации – лазерное сканирование и аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов;

– разработана технологическая схема выполнения геодезических работ при сборе информации для пространственного моделирования объектов недвижимости на урбанизированных территориях для целей 3D-кадастра и управления городом.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в обосновании выбора предложенного геодезического алгоритма сбора и обработки трехмерных пространственных данных для моделирования объектов недвижимости на урбанизированных территориях для ЕГРН, использование которого способствует формированию корректного и детализированного информационного базиса будущей системы 3D-кадастра в России, а также способствует внедрению парадигмы «умного города».

Практическая значимость работы. Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная методика сбора и обработки трехмерных кадастро-

вых данных включает необходимые для целей 3D-кадастра этапы расчета оптимальных параметров АФС, рекомендации по выполнению и обработке данных лазерного сканирования. Это позволит кадастровым инженерам проводить работы по созданию 3D-моделей объектов недвижимости, отвечающих требованиям действующего законодательства, и учитывает международные стандарты и практики. Подобные технические рекомендации применимы при разработке нормативно-правовых актов и методических рекомендаций при создании 3D-кадастра в РФ.

Методология и методы исследований. В диссертационной работе основу информационно-аналитических исследований составили материалы публикаций российских и международных специалистов, результаты опытных работ автора, а также использовались методы: многокритериальный сравнительный анализ, формализация и логико-аналитический, а также экспериментальный и верификационный анализ.

Положения, выносимые на защиту:

– предложенная схема интеграции гетерогенных форматов представления трехмерных данных (CityGML и IFC) совместно с разработанной дифференциацией существующих видов ОН на категории моделирования для использования в 3D-кадастре и эффективном управлении урбанизированными территориями ускорят цифровую трансформацию системы ЕГРН и сохранят необходимую точность при качественном повышении детальности результирующей базы данных ГИС;

– разработанный алгоритм расчета оптимальных параметров сбора трехмерных пространственных данных обеспечит систему 3D-кадастра трехмерными моделями объектов недвижимости, отвечающими точностным требованиям действующего законодательства;

– проведенная апробация предложенной методики сбора трехмерных кадастровых данных объектов недвижимости на урбанизированных территориях подтвердила ее соответствие нормативной точности действующего законодательства и продемонстрировала возможность имплементации в кадастровую практику и систему «умного» управления городом.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика диссертации соответствует следующим областям исследований: 5 – Принципы сбора, до-

кументирования, накопления, обработки и хранения сведений о земельных участках. Разработка единой методики по ведению земельного кадастра; 7 – Информационное обеспечение государственного земельного кадастра паспорта научной специальности 25.00.26 – Землеустройство, кадастр и мониторинг земель, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность полученных результатов исследований подтверждается практическими результатами апробации разработанной методики на трех разных объектах и проведенной оценке точности на всех этапах создания трёхмерных моделей объектов недвижимости для целей 3D-кадастра и «умного города».

Основные положения работы и результаты исследований докладывались, обсуждались и нашли положительный отклик на 11 научных мероприятиях:

- Международном молодежном научном форуме «ЛОМОНОСОВ-2019» (МГУ, Москва, апрель 2019 г.);
- Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы землепользования и управления недвижимостью» (УГГУ, г. Екатеринбург, апрель 2019 г.);
- Научном конгрессе 21-го Международного научно-промышленного форума «Великие Реки» (НГАСУ, Нижний Новгород, май 2019 г.);
- Российской агропромышленной выставке «Золотая Осень» (ВДНХ, Москва, октябрь 2019 г.);
- XXIII Московском международном салоне изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД 2020» (Москва, март 2020 г.);
- Всероссийской конференции с международным участием «Российский форум изыскателей» (Москва, октябрь 2020 г.);
- дважды на Международном научно-практическом форуме, посвященном 240-летию со дня основания Государственного университета по землеустройству (ГУЗ, Москва, май 2019 г.);
- LXII научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов «Научные исследования и разработки молодых учёных для развития АПК» (ГУЗ, Москва, апрель 2019 г.);

– LXIII научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов «Научные исследования и разработки молодых учёных для развития АПК» (ГУЗ, Москва, май 2020 г.);

– LXIV научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов «Научные исследования и разработки молодых учёных для развития АПК» (ГУЗ, Москва, апрель 2021 г.);

Результаты исследования внедрены в учебный процесс факультета городского кадастра федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет по землеустройству» по направлениям подготовки 21.03.02 Землеустройство и кадастры дисциплин «Геодезические работы при ведении кадастровой деятельности» и «Прикладная геодезия».

Публикации по теме диссертации. Основные результаты исследований и теоретические положения опубликованы в 6 научных статьях, из них 2 – в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, одна – в журнале, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка терминов и списка литературы, содержит 83 рисунка и 13 таблиц, 1 приложение. Общий объем диссертации 187 страниц машинописного текста. Список литературы включает 218 наименований, в том числе – 131 на иностранных языках.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ И РАЗВИТИЯ 3D-КАДАСТРА, ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Предпосылки выбора направления исследований

В современном мире выбор направления научных исследований является одной из самых сложных стадий научной работы. Сегодня научное знание стало столь обширно, разнообразно и специализированно, что выделить конкретный объект исследования без учета прямых и опосредованных взаимовлияющих факторов представляется невозможным. Актуальные научно-технические задачи, стоящие перед исследователями, характеризуются в первую очередь трансдисциплинарностью, то есть лежат в поле компетенций на пересечении нескольких областей. Но также каждый феномен необходимо рассматривать внутри всей глобальной системы взаимоотношений. Предсказал этот тренд еще в 70-х гг. прошлого века швейцарский философ Жан Пиаже [45]. Позже другие, уже современные ученые стали разделять его мнение [172]. Учитывая вышесказанное, в первом разделе уделено чуть больше внимания смежным вопросам и их анализу. Такие отступления призваны добавить глобальную перспективу развития рассматриваемой области научно-технических знаний.

Идея всемирного общественного развития соблазнительно неоднозначна. Возможно, именно по этой причине она стала одной из зародышевых идей нашей эпохи. Развитие, рассматриваемое как общественное движение, может распространяться не более чем на весь мир. Ученые давно фиксируют увеличение пространственной взаимной интеграции всех наций за счет артикуляции процесса развития по всему оседлому пространству мира через внутренне сбалансированную систему городов.

Специалисты различных областей научного знания уделяют большое внимание рассмотрению перспективы развития человеческого общества и образов хозяйствования. Индустриальная экономика не столько зависела от политических, культурных и социальных отношений, сколько их определяла (классическая марксист-

ская дихотомия базис – надстройка). В отличие от нее, экосистема человеческого образа хозяйствования в постиндустриальном обществе – это сложный многоуровневый организм, где каждый элемент взаимосвязан и взаимозависим, а изменения происходят с учетом возможностей и интересов всех игроков. Другая сторона аналогии с экосистемой – тесная взаимосвязь экономики с экологической ситуацией, которая сегодня становится все актуальнее в контексте любых форм человеческой деятельности. Одной из характерных тенденций, определяющих будущее, является рост значения городов, обретение ими политической субъектности и постепенное наращивание влияния на социально-экономические, информационно-культурные и технико-методические процессы [41, 11, 156, 80].

Все города состоят из плотной взаимосвязанной концентрации людей и экономической деятельности, хотя в урбанистической науке существует неясность относительно того, где и как следует устанавливать нижний предел размера агломерации, достаточного для статуса города. Тем не менее, признание плотности и высокой концентрации в качестве общих характеристик городов не дает возможности обобщать. Любая попытка построить общую концепцию города еще более осложняется тем фактом, что города также содержат огромное разнообразие уникальных феноменов и явлений организации городской жизни. Таким образом, перед многими науками, изучающими город, стоит задача, заключающаяся в том, чтобы учесть сложный комплекс сходств и различий [185].

Пространственная интеграция городов на планете хорошо видна на ночных снимках из космоса (рисунок. 1.1).

Разнообразные социально-экономические, исторические и биологические причины всегда лежали в основе образования, расширения и уплотнения населенных мест. Предпосылками к этому являются несколько важных обстоятельств.

Одной из первых предпосылок можно назвать осознание человеческой потребности в накоплении и распределении природных ресурсов, обогащении человеческого капитала, концентрации производства, интенсификации обмена и потребности в более эффективном управлении на небольшой площади с целью рациональ-

ного использования и наиболее полного удовлетворения разносторонних общественных и индивидуальных потребностей каждого члена общества.



Рисунок 1.1 – Паутина огоньков охватывает треть суши, демонстрируя связь человечества сквозь любые границы

В феномене урбанизации нашли свое отражение противоположные начала человеческой сущности – крайний индивидуализм и тяга к преодолению отчуждения человека от сообщества [17].

Вместе с этим нельзя отрицать сложившийся исторический факт, что уже сейчас в городах живет большая часть населения планеты. Цифры разнятся в зависимости от социально-экономических условий конкретных регионов планеты, но в странах ведущих экономик доля городского населения уже существенно больше 50 %.

К примеру, в России за последние 100 лет урбанизация увеличилась более чем в 4 раза. А именно доля населения в городских районах увеличилась с 17,50 % в 1914 г. до 74,20 % в 2014 г. Согласно оперативным данным Росстата, на 1 января 2020 г., представленным в докладе от 13.03.2020 «Оценка численности постоянного населения на 1 января 2020 года и в среднем за 2019 год», общая численность населения России на 1 января 2020 г. составляет 146 748 590 человек.

Городское население Российской Федерации на 1 января 2020 г. составляет 109 562 470 человек (74,66 %), сельское — 37 186 120 человек (25,34 %). Карта распределения плотности населения России по регионам представлена на рисунке 1.2.

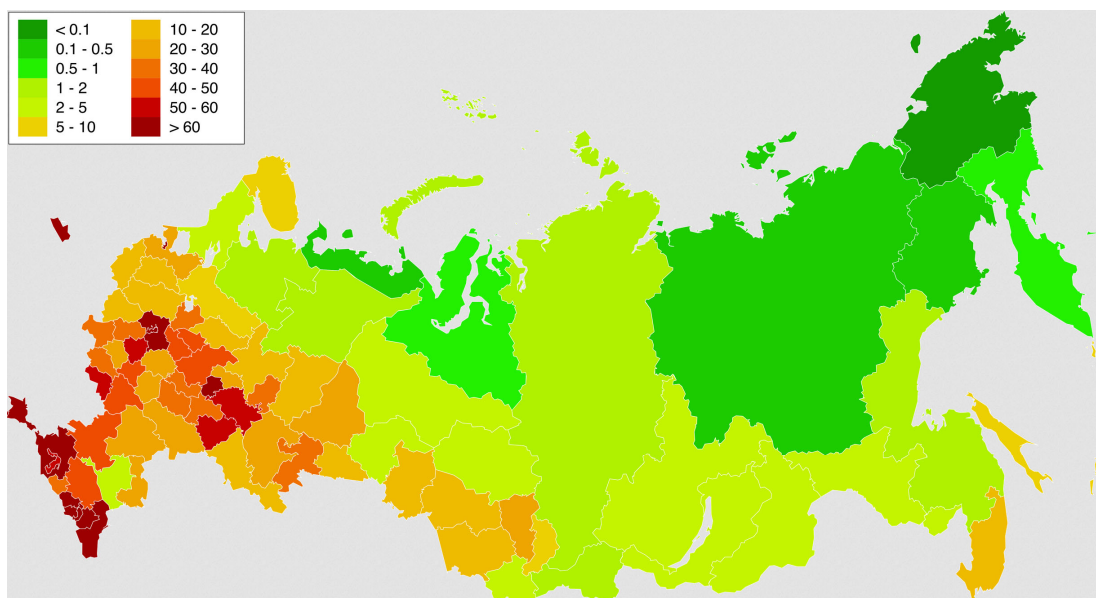


Рисунок 1.2 – Карта плотности населения России по регионам на 1 января 2019 г.

Следующее важнейшее обстоятельство-предпосылка выражается в понимании, что именно в городах сосредоточена подавляющая доля научных, образовательных, промышленных и других организаций, а также сконцентрированы властные и управленческие структуры всех уровней, предоставляются площадки и ресурсы для развития и интеграции новых высокотехнологичных бизнесов и сервисов.

Рассматривая высокотехнологичные отрасли человеческого хозяйствования, ученые выяснили, что существует четкая зависимость между комплексностью экономической деятельности и тенденцией к концентрации в больших городах. Так, согласно [127], компании, например, в области биотехники и полупроводникового производства гораздо чаще выбирают для своего расположения большие города, нежели компании по производству одежды и мебели.

Более сложные экономические процессы требуют более глубокого разделения компетенций и, следовательно, более эффективно работают в крупных городах

[215]. Это согласуется с идеей, что сложность знаний заставляет людей сужать свою специализацию [151]. Такое разделение создает затраты на координацию, которые могут быть сокращены с помощью многочисленных возможностей взаимодействия, предоставляемых городами [114, 185].

В современном мире очевидно, что именно города являются драйверами большей части инноваций социально-экономического характера. Вместе с тем, бурное развитие городов порождает и множество проблем различного характера: увеличение нагрузки на инфраструктуру, устаревание планировочных решений, обострение транспортных проблем, возрастающая экологическая нагрузка, скученность населения, морально устаревшие институты управления, утрата горожанами собственной идентичности и т. д. [41].

Похоже, что дальнейшая урбанизация неизбежна, хотя конкретные формы могут отличаться, и на этом фоне существенно возрастает интерес к проблемам эффективного городского управления, устойчивого развития и благоустройства среды обитания [41].

Анализируя работу [156], в которой авторы изучали все программные документы и резолюции Организации Объединенных Наций (ООН) с упоминанием городов, можно заметить особую акцентуацию на целях в области их устойчивого развития. Им посвящены различные специализированные повестки дня ООН за 2015–2016 гг., а также непосредственно документ «Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года» [209]. Важно отметить, что в этих документах признается центральное значение городов для достижения целей устойчивого развития, а также важности урбанизации как феномена и городских территорий как объектов с многосторонними отношениями. Авторы исследования настаивают, что это не является внезапным «сдвигом» повестки ООН или явлением, обусловленным только растущей популярностью «зеленой» повестки в мире [156].

Так, на рисунке 1.3 авторы исследования [156] приводят график постепенной возрастающей частоты упоминания городов в документах ООН. Эти данные наглядно отражают тренд.

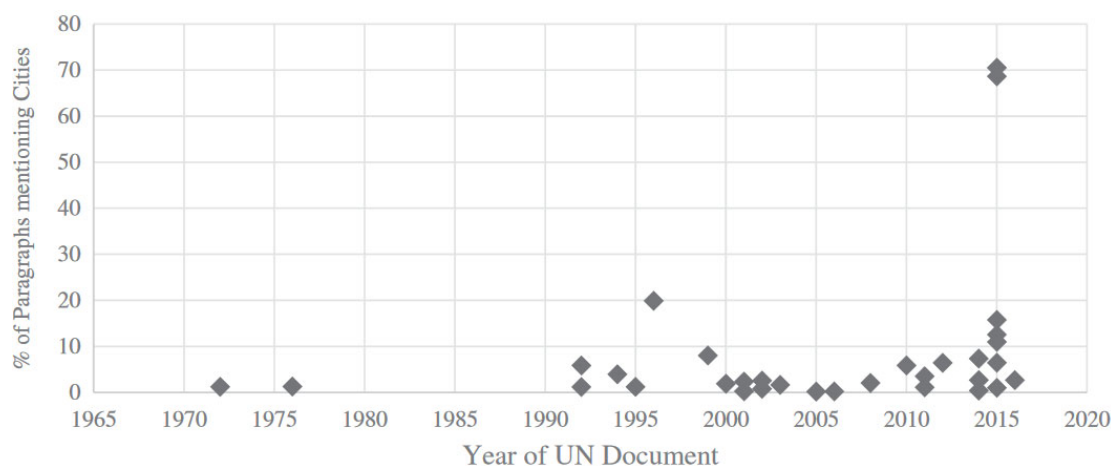


Рисунок 1.3 – Процент пунктов в документах ООН, в которых упоминаются города. Каждый маркер представляет один документ ООН [156]

Появление городов на мировой геополитической арене чаще всего связано с конкретными темами. В работе [156] проведен анализ и выделены наиболее упоминаемые темы, связанные с городами (рисунок 1.4). Отметим, что первую тройку по частоте и, следовательно, значимости составляют:

- 1 Развитие.
- 2 Окружающая среда.
- 3 Инфраструктура.

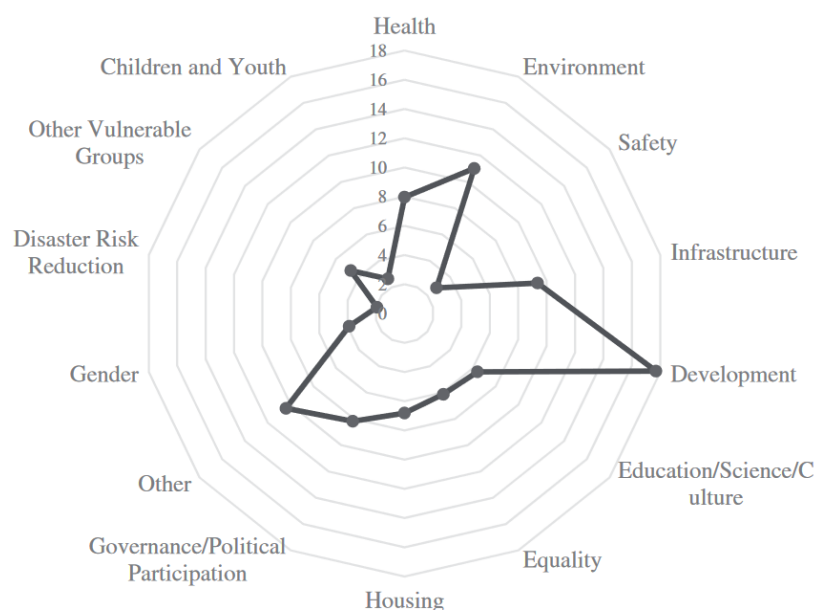


Рисунок 1.4 – Контекстуальный анализ упоминаний «городов» в документах ООН (в процентах от общих упоминаний) [156]

Согласно [195] в настоящее время города регулярно признаются стратегическими партнерами в международных процессах по таким вопросам, как изменение климата, бедность и устойчивое развитие. Многочисленные участники государственного и частного сектора призывают уделять больше внимания своей роли в решении наиболее актуальных глобальных проблем сегодняшнего дня [119, 125]. В 2015-16 гг. ООН признала это, включив «городскую» цель в области устойчивого развития (Sustainable Development Goal № 11 – SDG11) в свою основную Повестку дня на период до 2030 года [209] и подтвердила это в своей «Новой программе развития городов», предоставив весомые доказательства в отношении «глобальности» городской повестки дня [211, 170], такие как:

- половина человечества – 3,5 миллиарда человек – живет в городах, и, согласно прогнозам, к 2030 г. в городах будет проживать 5 миллиардов человек;
- 95 % урбанизации в ближайшие десятилетия будут проходить в развивающихся странах;
- сегодня в условиях крайней бедности проживает 828 миллионов человек, и большинство из них проживает в Восточной и Юго-Восточной Азии;
- города мира занимают всего 3 % площади Земли, но на них приходится 60–80 % потребления энергии и 75 % выбросов углерода;
- быстрая урбанизация оказывает давление на запасы пресной воды, канализационную и очистную инфраструктуру, среду обитания и здоровье населения;
- на города приходится от 60 до 80 % потребления энергии и производится до 70 % антропогенных выбросов парниковых газов;
- по прогнозам, к 2050 г. 70 % населения мира будет проживать в городских поселениях.

Многие эксперты как в научных кругах, так и в публичных дискуссиях утверждают, что города могут стать ключевыми игроками в международных усилиях, направленных на обеспечение устойчивого развития в глобальном масштабе [156, 98, 153, 197, 50, 25, 7].

«Одной из наиболее распространенных в настоящее время концепций, в которой находят свое отражение представления о будущем городов и способах решения

их проблем, является концепция «умного города»», – пишет в работе [41] отечественный ученый, профессор кафедры экономики и управления городом и городской инфраструктурой Санкт-Петербургского государственного экономического университета, доктор экономических наук Максимов С. Н.

Он определяет парадигму «умного города», во-первых как современный, новаторский способ достижения высокого качества жизни городского сообщества, а, во-вторых, как явление системное, интегрирующее в рамках единого городского пространства такие направления:

- 1) умная экономика;
- 2) умная мобильность;
- 3) умная среда;
- 4) умные люди;
- 5) умная жизнь;
- 6) умное управление.

Конкретизируя общее определение, можно сказать, что концепция «умного города» на данный момент скорее сводится к совершенствованию через цифровизацию и интеллектуализацию процесса управления городскими территориями и ресурсами. В основу концепции положено изменение инфраструктуры путем имплементации современных информационных технологий и методов, таких как Data science (Наука о данных), Big data (Большие данные), Augmented Reality (Дополненная реальность), нейросетевой анализ в ГИС и алгоритмы прогнозирования с использованием многомерных баз данных, как семантических, так и геопространственных, различные сенсорные системы учета и регистрации данных, например, система распознавания лиц граждан в Московском Метрополитене, система городского видеонаблюдения и фиксации автодорожных нарушений в разных городах России. Проще говоря, все сводится к информатизации и повышению уровня компьютеризации, внедрению современного ПО и созданию баз данных [41, 66, 87, 79, 167, 112, 201, 180, 162, 72, 23, 26, 32, 43, 50, 25, 1, 4, 3, 5, 2, 6].

1.2 Современное состояние области трехмерных систем управления земельными ресурсами (3DLAS) в рамках концепции «умный город»

Переходя от анализа опосредованных вопросов и смежных тематик, формулируем сложившийся общественный запрос, направивший усилия многих ученых в узкую сферу трехмерных систем учета, регистрации и управления земельными ресурсами.

Для наилучшего понимания раскроем принимаемое для данной работы определение земельных ресурсов. Автор включает в понятие земельных ресурсов все многообразие взаимовлияющих отношений между всеми возможными объектами недвижимости, правовым пространством в общем и для каждого конкретного объекта, а также экономико-хозяйственной ценностью каждого объекта. Таким образом ресурсом считается не только земельный участок или объект капитального строительства (ОКС), но и совокупность прав, обязанностей и ответственности вместе с показателями экономико-хозяйственной ценности объектов.

Под правовым пространством в рамках данной работы, согласно законам РФ, подразумевается юридически закрепляемое и государственно гарантируемое многообразие прав на недвижимое имущество.

Стремительно растущая и многообразно изменяющаяся роль городов приводит к формированию насущной потребности в более эффективном пространственном развитии городских территорий, глубоком проектном управлении городом и повышении качества жизни при соблюдении принципов устойчивого развития.

Отражением данного общественного запроса является возрастающая международная научно-практическая и исследовательская активность в разных областях, как уже было показано ранее. В этом разделе рассмотрим подробнее область технологий и методик получения, обработки и представления трехмерной геопространственной информации.

В первую очередь, в рамках диссертационного исследования, было проведено теоретическое исследование, демонстрирующее активизацию научного сообщества по вопросам технологий и методов сбора и представления трехмерной геопространственной информации и результатов ее обработки с целью формирования информационного-методического базиса для учета, проектирования и управления земельными ресурсами в границах городских территорий с учетом изменившихся потребностей. Как принято, в качестве одной из оценок научной деятельности возьмем количество публикаций за последние годы по указанным тематикам.

Важно отметить, что наиболее весомый вклад в развитие рассматриваемой тематики внесли следующие авторы: Van Oosterom P., Stoter J., Lemmen C., Zlatanova S., Larsson K., Ploeger H., Kitsakis D. (Нидерланды), Li L., Ying S. (Китай), Khoo V. (Малайзия), Thompson R., Rajabifard A. (Австралия), Paulsson J. (Швеция), Jdeed A. D. (Сирия), Doner F. (Турция), Господинова С. Г., Kostov G. P. (Болгария), Волков С. Н., Шаповалов Д. А., Папаскири Т. В., Хлыстун В. Н., Мазалов В. П., Иванов А. И., Юнусов А. Г., Сизов А. П., Басова И. А., Лисицкий Д. В., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Чернов А. В., Варламов А. А., Гальченко С. А., Карпик А. П., Кустышева И. Н., Вандышева Н. В., Тикунов В. С., Цветков В. Я. (Россия) и др.

Согласно [103, 144], в мировой практике большинство действующих систем учета и управления земельными ресурсами основаны на 2D-способе представления данных и не в состоянии приспособиться к разнообразию сложных ситуаций, вызванных реалиями современного мира. Все уровни власти сталкиваются с беспрецедентным требованием использования пространства над и под земной поверхностью. Кроме того, текущая потребность общества в устойчивости общественной среды и глобальный запрос на мышление в формате полного жизненного цикла какого-либо объекта / феномена стимулирует необходимость интеграции государственных систем с автономными базами данных и методологиями. Такие данные связаны с различными аспектами жизненного цикла пространственного развития

территорий человеческого хозяйствования (Spatial Development lifeCycle – SDC). В свою очередь системы управления земельными ресурсами (Land Administration System – LAS) являются важным компонентом SDC.

Эффективная и надежная система управления земельными ресурсами является основой для устойчивого развития территорий городов и растущей экономики страны. Судя по мировому опыту, кадастровая база данных воспринимается как ядро системы управления земельными ресурсами, связывая три ее основных компонента:

- люди;
- пространство;
- права, ограничения, обязанности (Rights, Restrictions, Responsibilities – RRR).

Ожидается, что кадастровая база данных будет предоставлять всем заинтересованным агентам полную и актуальную информацию о границах участков и правах, а также связанных с ними правовых отношениях [212]. Права собственности могут относиться к пространствам выше или ниже поверхности Земли и этому есть много примеров [192].

Таким образом возникает серьезная проблема – двухмерное проекционное представление RRR не может корректно отражать перекрывающиеся физические и юридические границы недвижимого имущества, расположенного на разной высоте. Действующий двумерный кадастр не позволяет четко увидеть и осуществить учет таких объектов недвижимости, как многоуровневые комплексы нестандартной формы, с нависающим вторым, третьим этажом или вылетающими консолями, попадающими на чужую территорию. В профессиональной среде участников кадастровой деятельности возникают ситуации, подобные описанной в работе [62].

Современные многоэтажные здания, тоннели и инженерные сети требуют строительства надземных и подземных сооружений. Для иллюстрации недостатков существующей системы 2D кадастра рассмотрим следующие примеры.

Первым рассмотрим случай комплексного строительства на одном земельном участке.

На рисунке 1.5 приведен пример сочетания разных видов собственности, расположенных на одном земельном участке и конструктивно объединенных физически в один объект недвижимости, а также метод их представления в 2D-системах кадастра. Из рисунка понятно, что отсутствие отображения зарегистрированных прав собственности на конкретные объекты недвижимости, входящие в состав физически объединенного объекта недвижимости, вносит путаницу в сведения на публичной кадастровой карте.

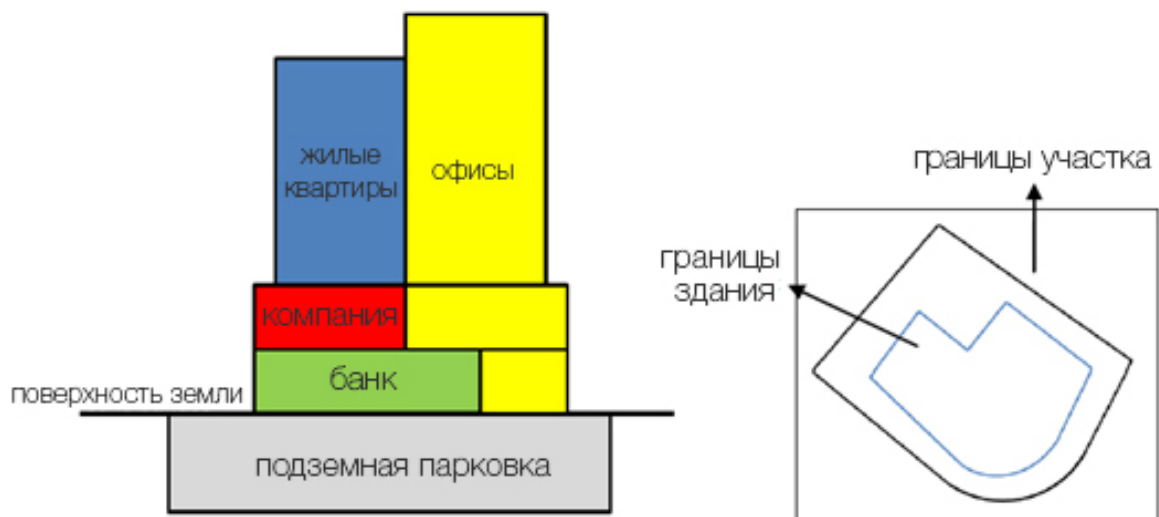


Рисунок 1.5 – Многоквартирные жилые и коммерческие здания на одной площадке и ее представления в двумерной системе кадастра

Похожий пример приведен на рисунках 1.6–1.8, где изображен Технопарк в г. Новосибирске, который имеет два здания, соединенных переходом на уровне последнего этажа. Однако этот объект на публичной кадастровой карте отображается как два отдельных ОКС. Подобный пример приведен на рисунке 1.9.

Рассмотрим второй случай комплексного строительства, когда объекты пересекают несколько земельных участков (рисунки 1.10, 1.11).



Рисунок 1.6 – Технопарк, г. Новосибирск, Советский район, ул. Николаева, 12

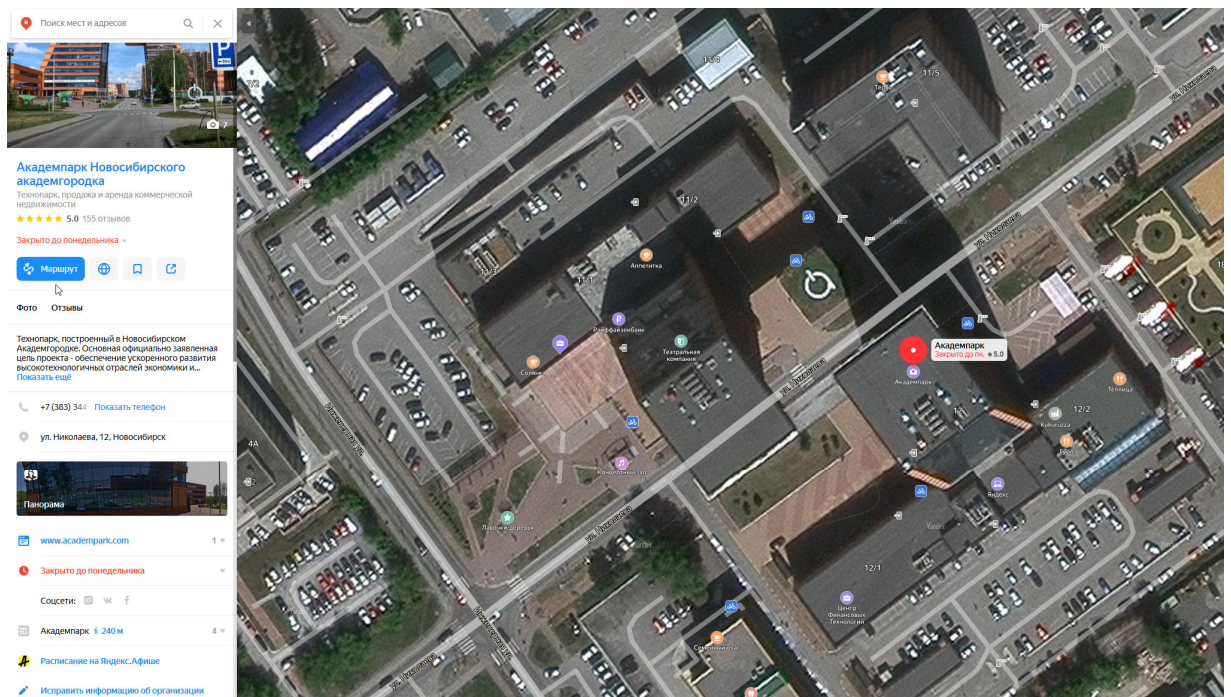


Рисунок 1.7 – Технопарк, г. Новосибирск, Советский район, ул. Николаева, 12,
вид на Яндекс Картах

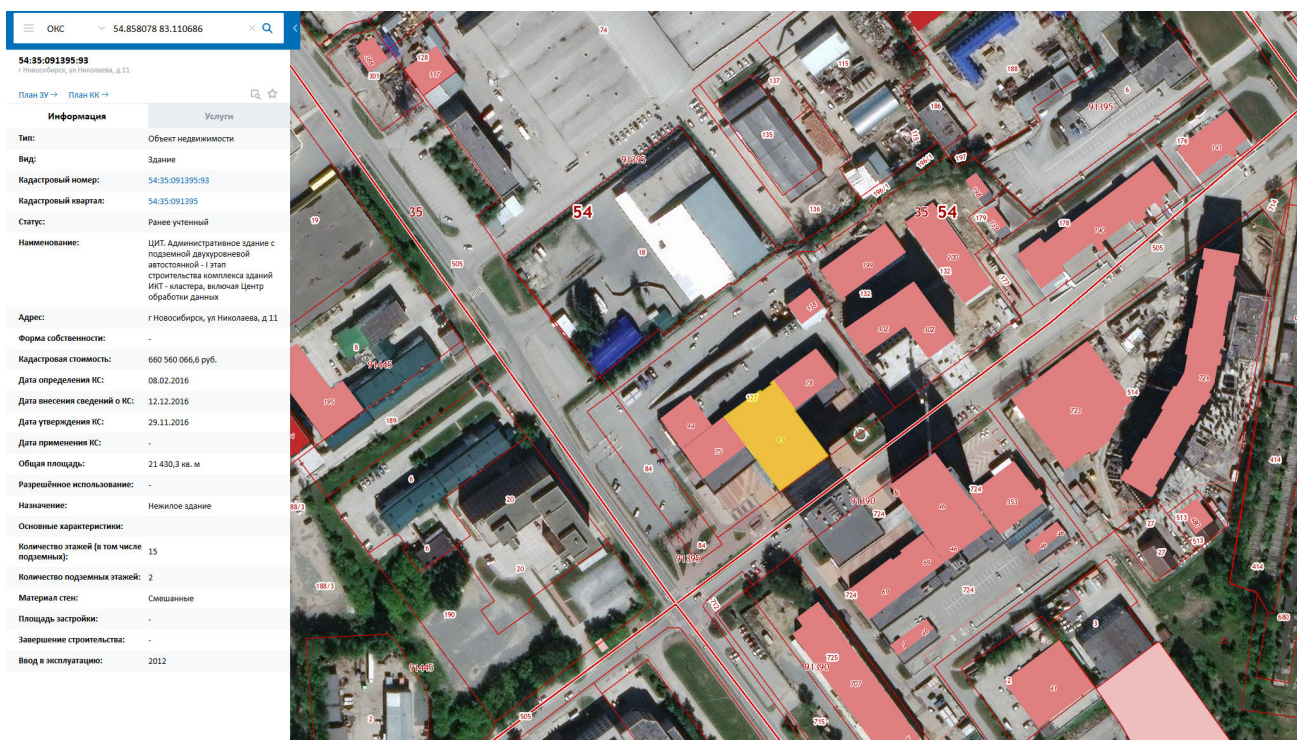
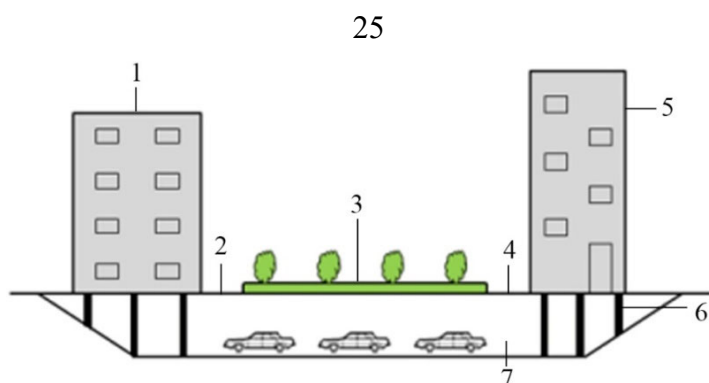


Рисунок 1.8 – Технопарк, г. Новосибирск, Советский район, ул. Николаева, 12, проекция контура ОКС на плоскость публичной кадастровой карты.

Переход между зданиями не отражен как часть контура



Рисунок 1.9 – Пример здания в Словении и его отображения на кадастровой карте [208]



1, 5 – многоэтажные здания; 2, 4 – улицы; 3 – парк; 6 – сваи для удержания здания;
7 – автостоянки

Рисунок 1.10 – Профиль участка комплексного строительства с пересекающимися с несколькими земельными участками и объектами

Современная городская среда часто требует инфраструктуры, размещение которой на одном земельном участке невозможно. Такие инфраструктурные объекты, как подземные автостоянки или станции метрополитена, телекоммуникационные и другие трубопроводы, требуют дополнительных мероприятий при размещении на местности и таким образом повышают важность учета и регистрации каждого случая. Большие инфраструктурные комплексы сильно усложняют процесс проектирования и влияют на управление территорией [99].



1, 5 – многоэтажные здания; 2, 4 – улицы; 3 – парк (сквер)

Рисунок 1.11 – Кадастровая карта для конфигурации на рисунке 1.10

Другой пример многофункционального жилого комплекса с разноуровневыми многоконтурными частями, физически объединенными в один объект, показан на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 – Жилой комплекс Interlace в Сингапуре
напоминает аккуратную стопку блоков Jenga

Рассматривая опыт России, отметим, что на данный момент система ЕГРН в Российской Федерации хранит только плановые координаты об объектах. Внедрение трехмерной системы кадастра в РФ требует серьезных усилий. Необходим глубокий экспертный анализ существующей нормативно-правовой базы и разработка решений разных технических проблем.

Согласно земельному Кодексу Российской Федерации [21], земельный участок определяется как двумерный объект, а не трехмерный, но согласно Федеральному закону от 24.07.2007 г. № 221-ФЗ «О кадастровой деятельности» [52], в дополнение к земельным участкам, земельный кадастр содержит и объекты трехмерного характера, такие как здания, сооружения, помещения и объекты незавершенного строительства. Поэтому в целях определения и закрепления права

в трехмерном пространстве требуется создать новые трехмерные системы кадастра, которые помогут управлять и представлять права на землю, в трехмерном виде.

В России в 2010 г., Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии (далее – Росреестр) в сотрудничестве с агентством кадастра, регистрации земель и картографии Нидерландов выполнила уникальный проект под названием «Создание модели трехмерного кадастра объектов недвижимости в России» [89].

Главной задачей данного проекта являлась оценка возможности введения трехмерного кадастра в РФ. В качестве объекта исследования для реализации проекта были выбраны три объекта в Нижегородской области:

- объект по адресу: ул. Белинского, д. 9/1. Многоэтажное здание с подземной парковкой. Имущественные права на части объекта закреплены за разными лицами. (рисунок 1.13, *а*);
- объект по адресу ул. Невзоровых, 66а. Жилой комплекс с подземной парковкой (рисунок 1.13, *б*);
- объект по адресу ул. Пискунова. Газопровод среднего давления.

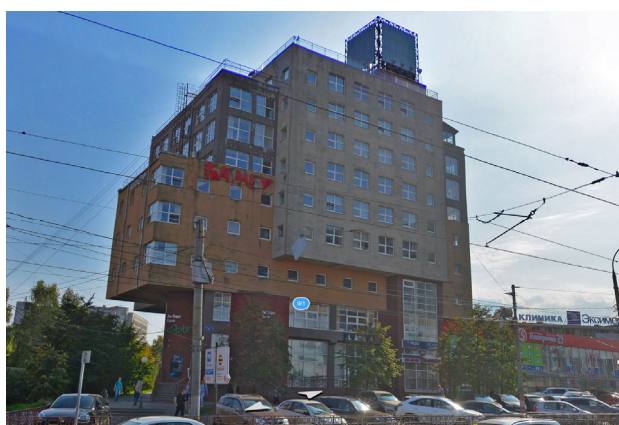
*а)**б)*

Рисунок 1.13 –Пилотные объекты:

а) многоуровневое здание; *б)* жилой комплекс

Результатом проекта стало создание трехмерной модели кадастра для разработки сведений об объектах недвижимости в соответствии с юридическими условиями России. Также разработан метод подготовки исходных данных для объектов недвижимости в трехмерной системе кадастра.

В ходе анализа результатов пилотного проекта подтверждается возможность внедрения трехмерной системы кадастра в РФ. Вдумчивое планирование и тесное сотрудничество с клиентами позволят достичь хорошего результата в развитии существующей системы кадастра недвижимости.

Учитывая, что работа по теме 3D-кадастра находится на разных этапах в зависимости от научно-технических и социальноэкономических условий стран, необходимо обмениваться опытом на международном уровне. Площадку для такого обмена предоставляет объединенная комиссия по 3D-кадастрам Международной федерации геодезистов (FIG), состоящая из комиссии № 3 «Управление пространственной информацией» и комиссии № 7 «Кадастр и землеустройство». Объединенная комиссия по 3D-кадастрам (рисунок 1.14) занимается основными публикациями и исследованиями по теме. Комиссия проводит ежегодные рабочие недели, где участники проходят опросы и выступают с докладами. Результаты опросов анализируются и публикуются в работах [103, 148], или издается сборник лучших практик и наиболее значимых публикаций, работы [212, 121].

«Начало международного осознания этой темы было ознаменовано первым семинаром по 3D-кадастрам (спонсором которого выступили комиссии FIG 3 и 7), организованным Делфтским технологическим университетом в ноябре 2001 г. За ним следовала практическая сессия на каждой рабочей неделе FIG и конгресс после этого (под эгидой рабочей группы FIG по 3D-кадастрам 2002–2006 гг.). Возрастающая сложность инфраструктуры и высокая плотность населений городских районов требует надлежащей регистрации правового статуса (частного и государственного), который может быть предоставлен только в ограниченной степени существующими двухмерными кадастровыми системами. Несмотря на все исследования и прогресс на практике, ни в одной стране мира нет настоящего 3D-кадастра,

в некотором роде функциональность всегда ограничена...», – говорится на главной странице сайта объединенной комиссии по 3D-кадастрам FIG [71].

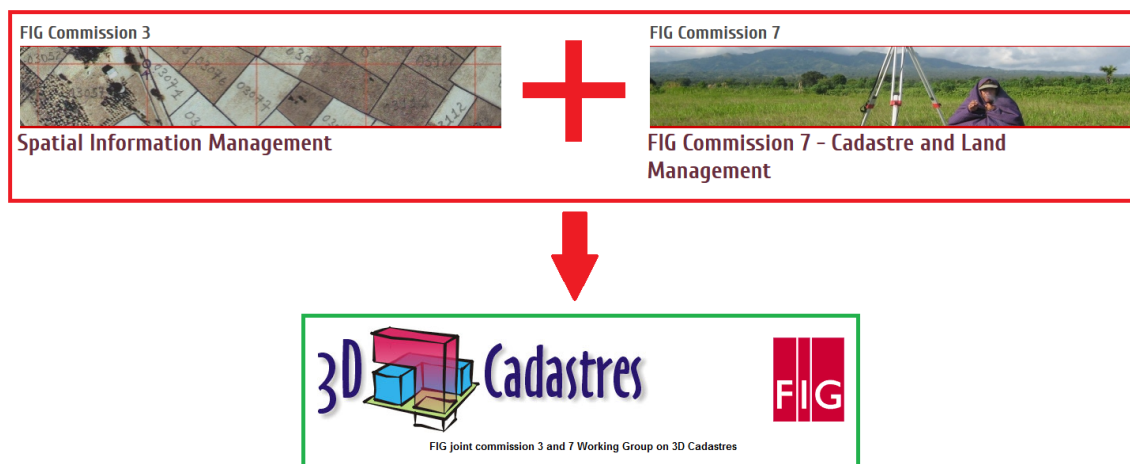


Рисунок 1.14 – Объединенная комиссия по 3D-кадастрам Международной федерации геодезистов (FIG)

Актуализируя значительные данные автора [83], виден продолжающийся тренд на увеличение интенсивности разработки и обмена опытом специалистов в области трехмерных кадастровых систем по всему миру.

Анализируя данные, представленные на рисунке 1.15, можно подчеркнуть, что в современных условиях количество исследовательских работ, признаваемых FIG важными, только растет, что, очевидно, отражает актуальный общественный запрос на дальнейшую разработку тематики.

Рассмотрим следующий важный элемент научного дискурса по теме. Концептуальная модель сферы управления земельными ресурсами (Land Administration Domain Model – LADM), ставшая международным стандартом (ISO19152) в этой области, является наиболее важной разработкой. Она используется для составления так называемых «профилей страны» – формализованных, в установленной терминологии и согласно общему стандарту, схемах, описывающих многообразие правовых и технических аспектов каждой конкретной страны в области регулирования и управления земельными ресурсами.

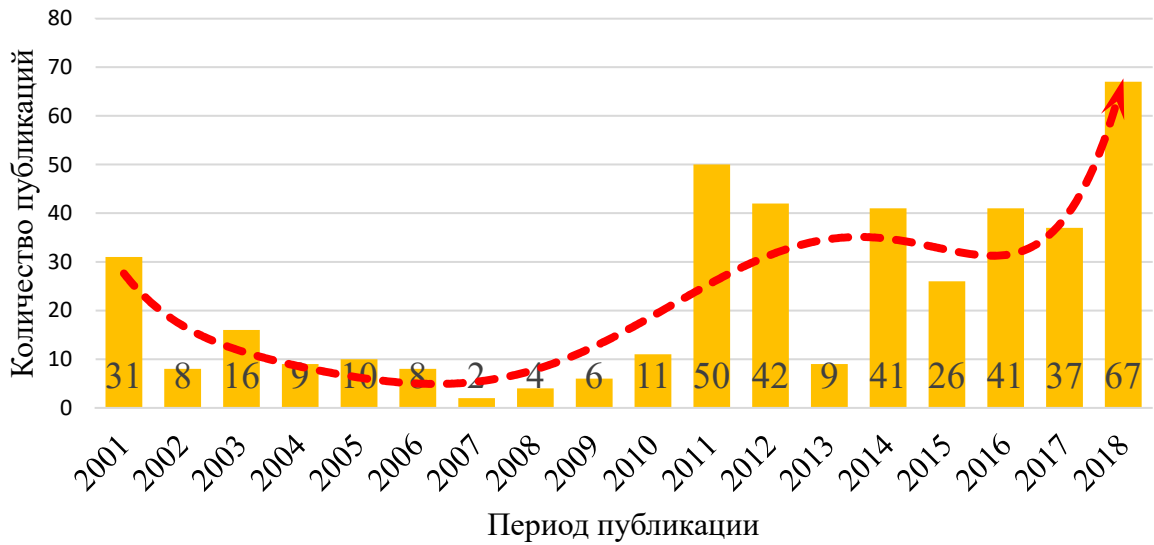


Рисунок 1.15 – Статистика объема значимых публикаций по теме 3D-кадастров по данным объединенной комиссии по 3D-кадастрам Международной федерации геодезистов (FIG) на май 2020 г.

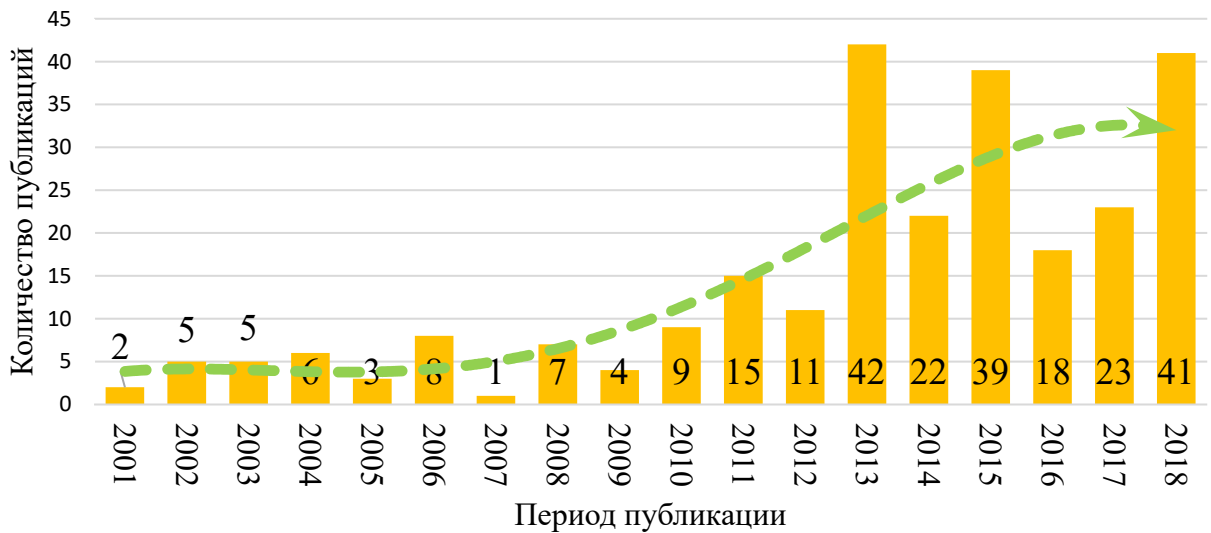


Рисунок 1.16 – Статистика объема значимых публикаций по теме: «Модель управления земельными ресурсами (LADM ISO19152)» по данным Дельфтского университета [130] на май 2020 г.

Данные на рисунках 1.15 и 1.16 приведены только до 2018 г. согласно частоте обновления данных сайта FIG. Ввиду расписания запланированных рабочих недель комиссии в 2020 г., возможно, данные не будут актуализированы на 2019 и 2020 гг. из-за пандемии COVID-19. Тренд подтверждается.

Наблюдая восходящий тренд на рисунке 1.16, можно смело говорить, что с увеличением количества трехмерной кадастровой информации LADM стала широко использоваться во всем мире – это происходит благодаря реализации 3D-представлений пространственных данных без дополнительной нагрузки на существующие 2D-системы. По сравнению с другими моделями кадастровых данных, такими как Гармонизированная модель данных ICSM [206], LADM – это международный стандарт, разработанный и одобренный Международной организацией по стандартизации (ISO). Он обеспечивает открытую эталонную модель для обмена и совместного использования кадастровой информации между несколькими системами в разных организациях. Кроме того, LADM обладает более высокой рентабельностью и более высоким качеством организации хранения данных, что также делает ее более привлекательной в качестве 3D-кадастровой модели (рисунок 1.17).

Отметим, что указанная концептуальная модель уже принята в качестве основы для российского трехмерного кадастра и актуализирована в работе [89] с учетом отечественных особенностей.

Модель LADM включает четыре базовых пакета, относящихся:

- 1) к субъектам (людям и организациям);
- 2) основным административно-территориальным единицам, правам, обязанностям и ограничениям;
- 3) пространственным объектам (парцеллам, зданиям, инженерным сетям);
- 4) источникам пространственной информации (съемкам) и пространственному отображению (геометрии и топологии) [20].

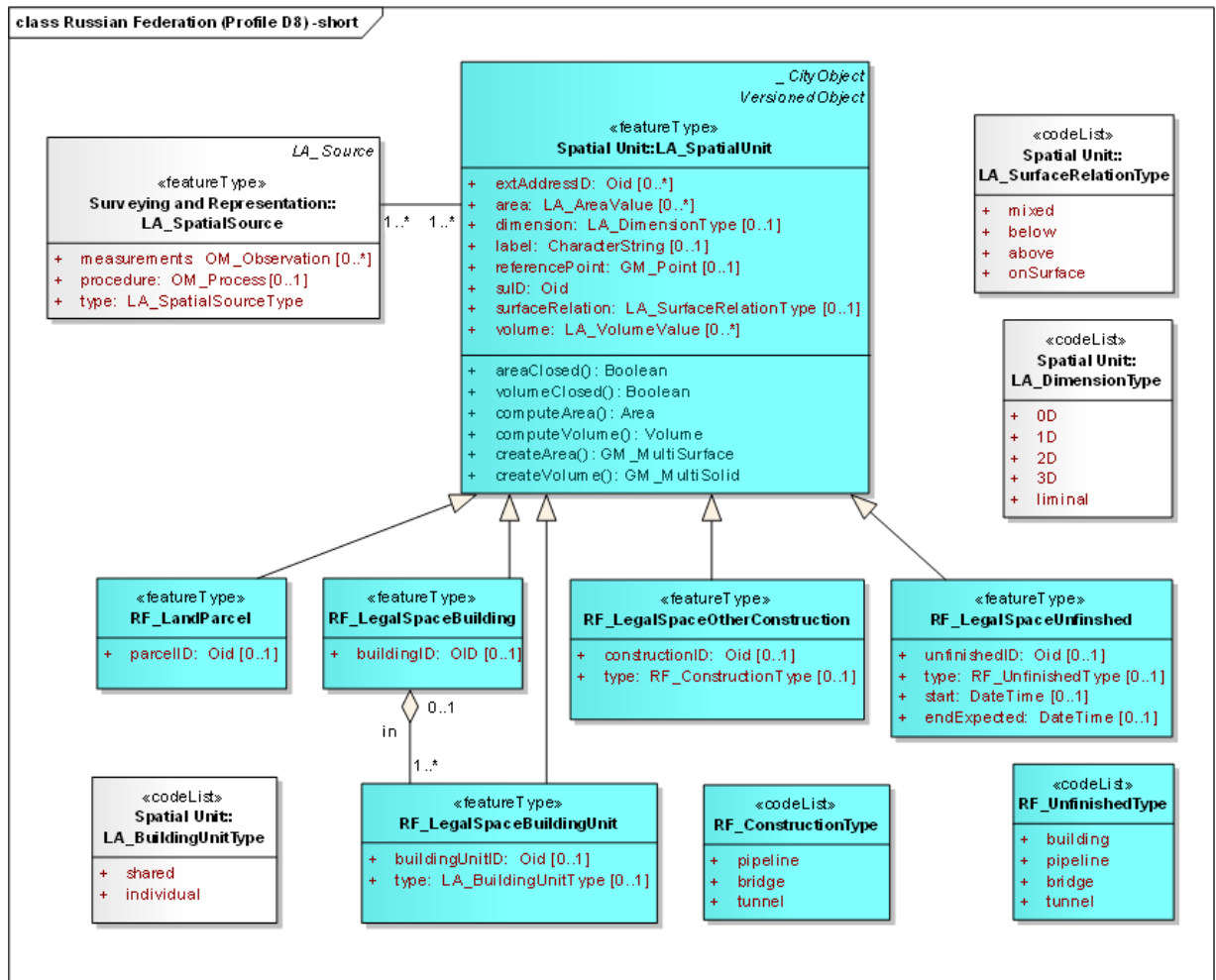


Рисунок 1.17 – Начальная Модель предметной области для управления недвижимостью (LADM, включающая пять различных видов кадастровых объектов, для пилотного проекта по созданию трехмерного кадастра в Российской Федерации (в терминологии – LA_SpatialUnitsLADM)

Рисунки 1.18, 1.19 также демонстрируют схожую тенденцию академической активности по вопросам, связанным с непосредственной технической имплементацией новейших разработок по теме трехмерных реестров объектов недвижимости и систем управления земельными ресурсами в сельских и высокоурбанизированных территориях.

CityGML является одним из наиболее важных международных стандартов, который используется для моделирования городов и ландшафтов в 3D. По сравнению со стандартами BIM, такими как IFC, модели CityGML обычно менее детализиро-

ваны, но охватывают гораздо большую территорию. Они также доступны в любом из четырех стандартных уровней детализации (Level of Details – LoD 1 – LoD 4). Этот стандарт также служит форматом обмена и источником данных для визуализации в специальных приложениях или в веб-браузере. Будущие исследования направлены на улучшение интеграции стандартов BIM и CityGML, что в свою очередь отразится на интероперабельности на протяжении всего жизненного цикла городских и экологических процессов [165].

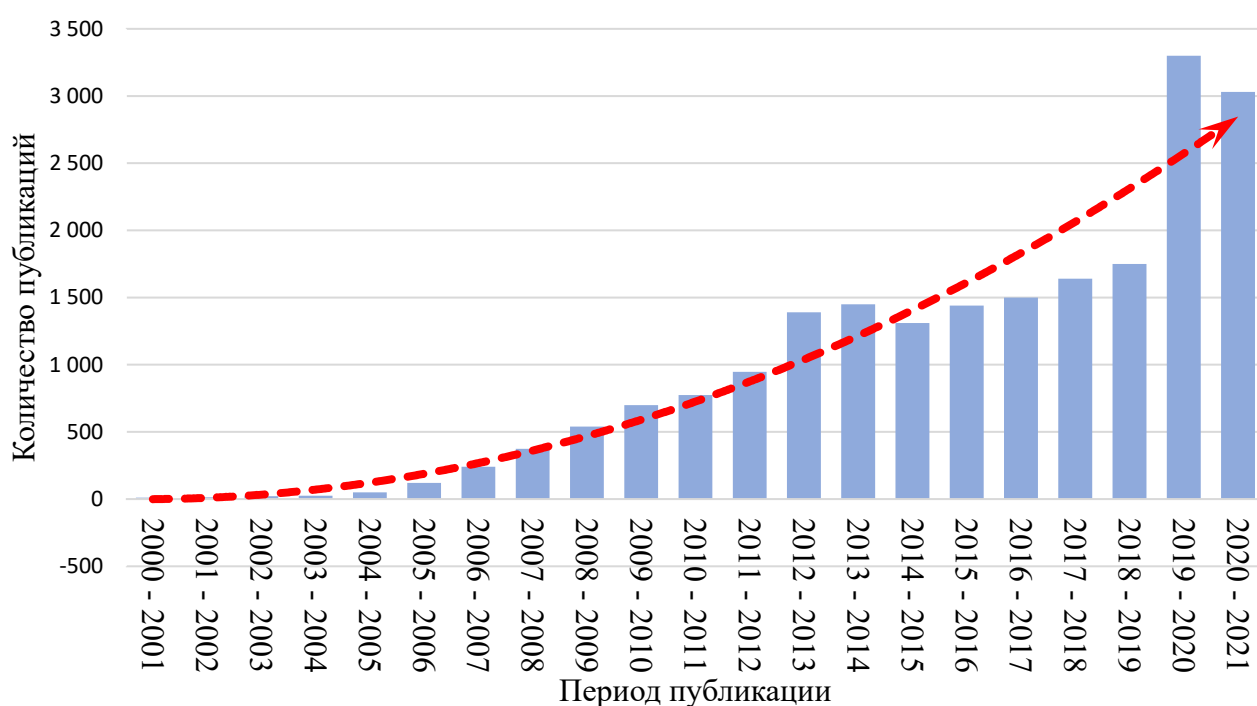


Рисунок 1.18 – Статистика частоты упоминания термина «CityGML» по данным GoogleScholar

В целом формат IFC, или «отраслевые базовые классы», представляет собой стандартизированное схематичное цифровое описание застроенной среды, включая здания и инфраструктуру. Это открытый международный стандарт (ISO 16739-1: 2018), предназначенный для того, чтобы быть независимым от производителя и использоваться в широком спектре аппаратных устройств, программных платформ и интерфейсов для многих различных вариантов применения.

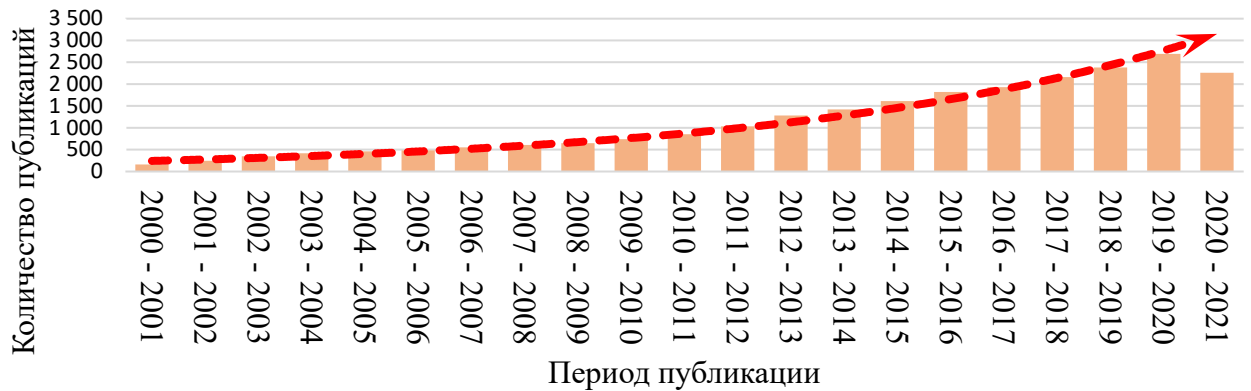


Рисунок 1.19 – Статистика частоты упоминания термина «IFC – "Industry Foundation Classes"» по данным GoogleScholar

Особое внимание в публикациях последних лет уделено повторному использованию данных BIM, представленных с использованием IFC [130, 149] в 3D LAS. Подобные системы управления земельными ресурсами уже сейчас обсуждаются международным научным сообществом. К примеру, в статье [90] авторы рассуждают о возможности интегрирования разнородной трехмерной системы управления земельными ресурсами 3D LAS с помощью веб-архитектуры.

Непосредственно вопросу создания и развития трехмерных систем управления земельными ресурсами пока уделяется не так много внимания, что видно на рисунке 1.20.

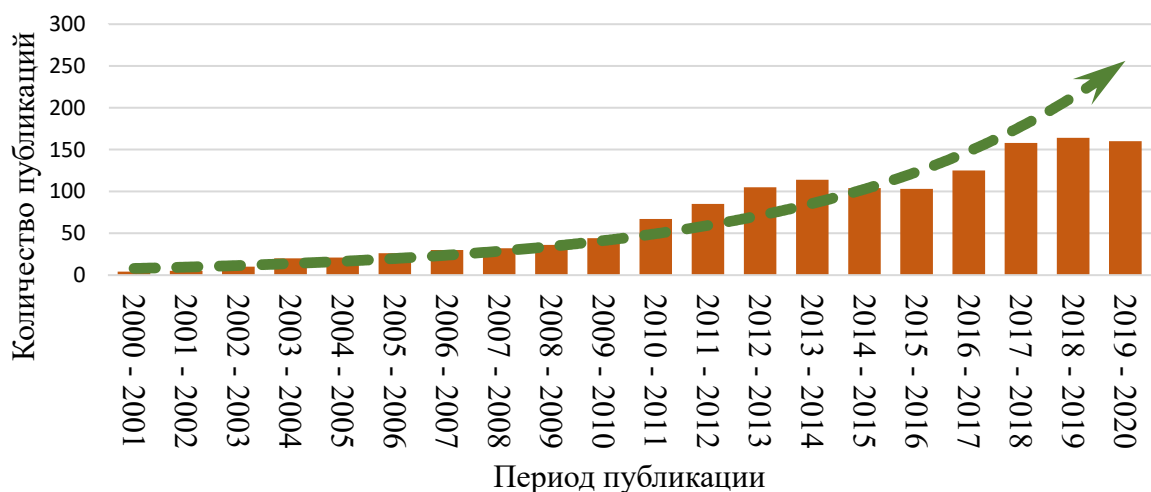


Рисунок 1.20 – Статистика частоты упоминания термина «3DLAS – "Land Administration System"» по данным GoogleScholar.

Поскольку в повестке ООН до 2030 г., как было показано выше, окружающая среда урбанизированных территорий занимает второе место по значимости, проанализируем также и публикационную активность по темам «Городской лес», «Устойчивость городских насаждений», результаты анализа публикационной активности представлены на рисунке 1.21. Городские леса приносят много пользы жителям, а также могут повысить устойчивость городов, общую способность восстанавливаться после антропогенных и природных нарушений. Устойчивость часто рассматривается с экологической, социальной или социально-экологической точки зрения.

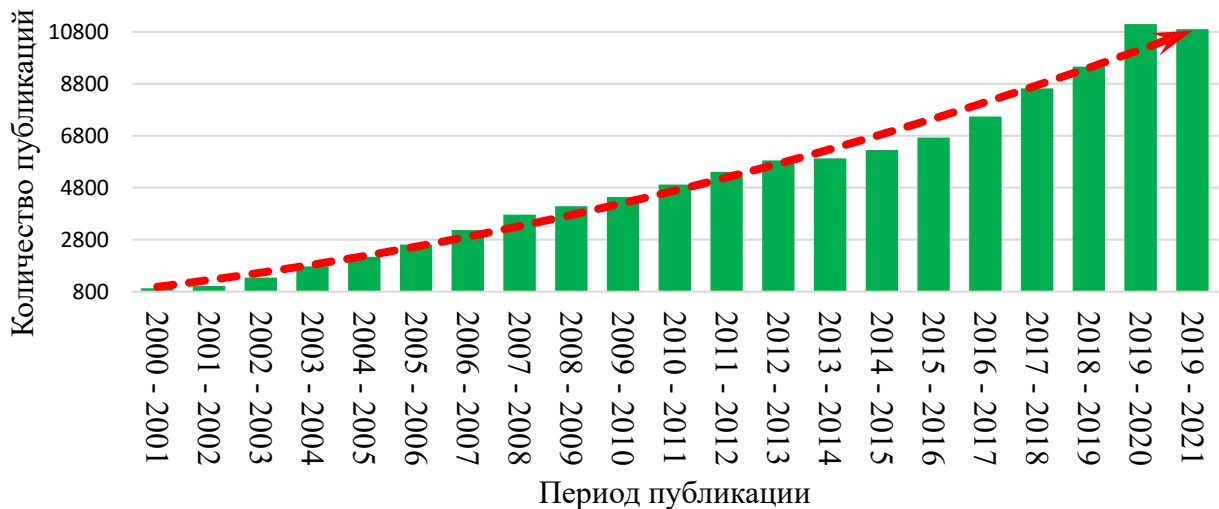


Рисунок 1.21 – Статистика частоты упоминания термина «Urban Forestry» по данным GoogleScholar

Таким образом, для исследования в научном поле были очерчены условные сегменты по темам или технологиям, относящимся к задачам развития, окружающей среды и инфраструктуры в контексте городской повестки. Разработки в выбранных сегментах были проанализированы по количеству публикаций, индексируемых в Google Scholar за период с 2000 г., для выявления тренда. Выбранные сегменты представлены на рисунке 1.22, а выявленный тренд показан на рисунке 1.23.

Сегмент	City GML	IFC	3D Land Administration System	BIM	LADM	Urban Forestry
---------	----------	-----	-------------------------------	-----	------	----------------

Рисунок 1.22 – Сегменты анализа публикационной активности. Источник: City GML, IFC, 3D Land Administration System, BIM, LADM, Urban Forestry – по данным Google Scholar

Чтобы получить удобный ряд величин в одном диапазоне, для проведения сравнительного анализа собранные данные (количество публикаций за каждый период по каждому сегменту) были нормализованы (логарифмированы по основанию 10). Затем производилось суммирование значений всех сегментов по каждому временному периоду.

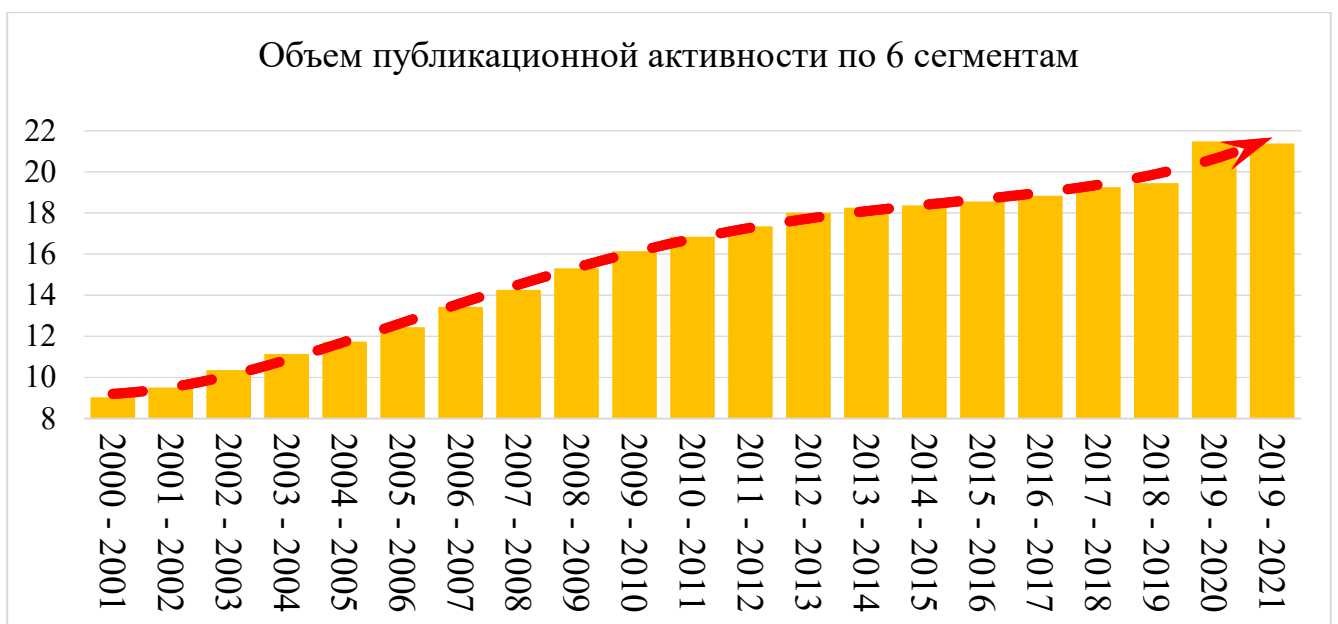


Рисунок 1.23 – Нормализованные данные по совокупности публикаций по всем сегментам за каждый временной период

Наблюдая предложенные данные и исследуя различные источники, можно заключить, что совокупный рост публикационной активности неполно свидетельствует о развитии сферы в целом, так как может быть обеспечен несимметричным развитием только в одном направлении.

Для иллюстрации секторного развития обратимся к графику на рисунке 1.24. Представленные доли, отражающие вклад каждого сектора в общее развитие предметной сферы, выглядят соотносимыми, а асимметричность объясняется уровнем практической реализации разработок в сегменте на данный момент.

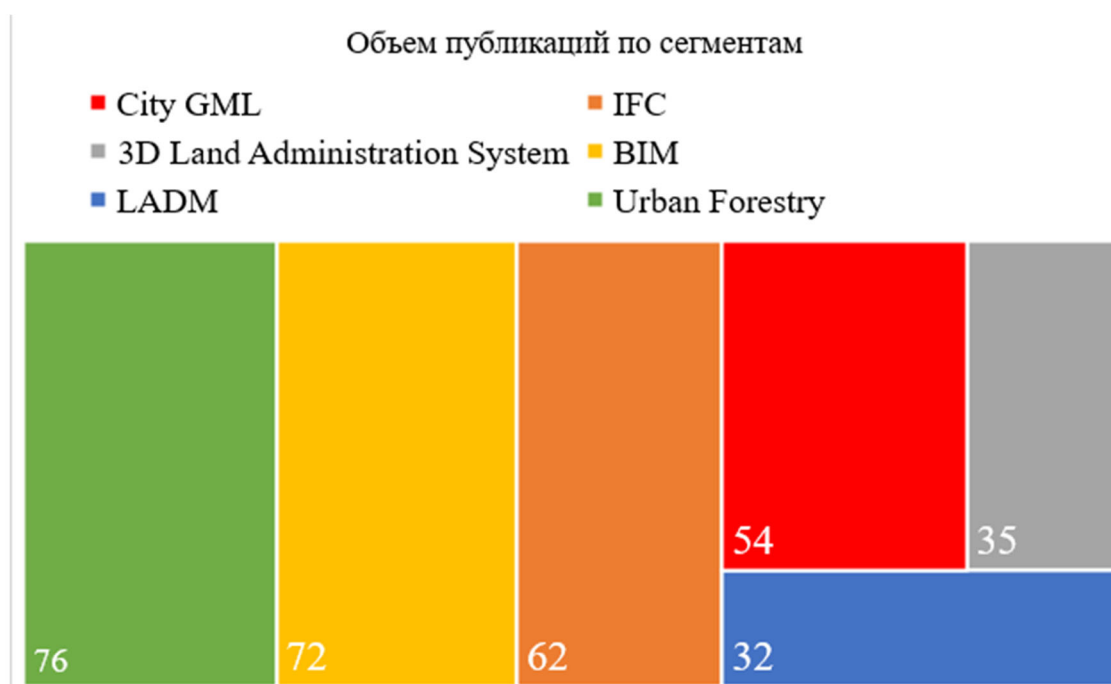


Рисунок 1.24 – Сегментированный объем публикаций в рассматриваемой предметной сфере за период с 2000 по 2021 г.

Рассмотренные тренды международной публикационной активности, касающиеся развития тематики внедрения многомерных кадастров и трехмерных систем управления земельными ресурсами в рамках концепции «умного города», наглядно демонстрируют актуальность разработки данной тематики. Это также подтверждается анализом международного и отечественного опыта создания и обсуждения концепции «умных городов» [166, 124, 30, 29, 80, 187]. Также отметим, что задача создания нового подхода к управлению земельными ресурсами в России рассматривается известными учеными в области землеустройства в работах [89, 63, 64, 81, 9]. Следует отметить, что исследования в области трехмерного моделирования территорий находят все более широкое применение и для систем «точного землед-

лия», экологического контроля и многих других областей экономической деятельности.

Первые заметные достижения в области «умных городов» и трехмерных систем управления земельными ресурсами проявляются, например, в Англии, где была создана специальная организация Future Cities Catapult, разработавшая и внедрившая умную модель столицы соединённого королевства, в Финляндии запроектирована и введена в эксплуатацию умная система экологичной логистики транспорта, в Южной Корее определены показатели экономической эффективности строительства крупного транспортного узла на основе расчета параметров пассажиропотоков.

Также стоит отметить наличие специализированных рабочих групп, представляющих данные страны, и экспертов из Германии и США [138], которые проводят исследования по внедрению «умных городов» в Китае, Индии, Малайзии, Сингапуре, Индонезии [133, 164] и ряде других стран.

Далее в работе (см. подраздел 2.2) отдельно будет рассмотрен вектор развития и отдельные шаги в сфере внедрения концепции «умного города» в Российской Федерации.

Изучение разными авторами [12, 196, 202] и более всего в работе [90] положительного опыта ряда стран помогло выявить распространённые проблемы, препятствующие внедрению систем (элементов систем) «умных городов» и трехмерных систем управления на основе 3D-кадастра:

- 1) рассеянность баз данных об инфраструктуре, эффективности и показателях устойчивого использования земельно-имущественных ресурсов;
- 2) несогласованность форматов баз данных и внутренних требований к информации;
- 3) отсутствие технической, методической и кадровой подготовки, развитой информационной инфраструктуры сбора и обработки кадастровых и городских данных;
- 4) отсутствие единого городского портала на базе кадастровых данных, позволяющего объединять различные умные технологии (базы данных ЕГРН, ГИС ЖКХ,

ФНС, сенсорные системы, аварийные службы и т. д.), а также анализировать и визуализировать существующие данные.

Разные авторы отмечают, что наивысший приоритет для исследования представляют проблемы 1 и 3.

Отдельно отметим, что, на наш взгляд, задача приведения разнородной информации к единообразному виду / формату и организация простого доступа к ней должна стать первоочередной для государственных органов, ввиду прямого социально-экономического и административно-хозяйственного крайне позитивного воздействия на всю систему управления земельными ресурсами в стране.

Учитывая сказанное выше, можно сформулировать задачи, которые должен решать 3D-кадастр как ядро трехмерной системы управления земельными ресурсами в рамках парадигмы умного города:

- 1) полное и правильное представление правового пространства, согласованного с физическими границами ОН;
- 2) внедрение единой цифровой геопространственной модели на городскую территорию как информационного базиса для управления ресурсами;
- 3) регистрация перекрывающихся и пересекающихся ОН;
- 4) учет многофакторности городской инфраструктуры и визуализация их взаимодействия;
- 5) стимуляция развития сферы ВМ-технологий с последующей интеграцией;
- 6) нормативно-правовая и информационно-аналитическая поддержка реализуемых управленческих решений;
- 7) интеграция международного стандарта CityGML [169] в область управления земельными ресурсами и городскими территориями конкретной страны.

На основании приведенных рассуждений составлена укрупненная схема парадигмы трехмерной системы управления земельными ресурсами, представленная на рисунке 1.25.

Парадигма трехмерной системы управления земельными ресурсами на урбанизированных территориях

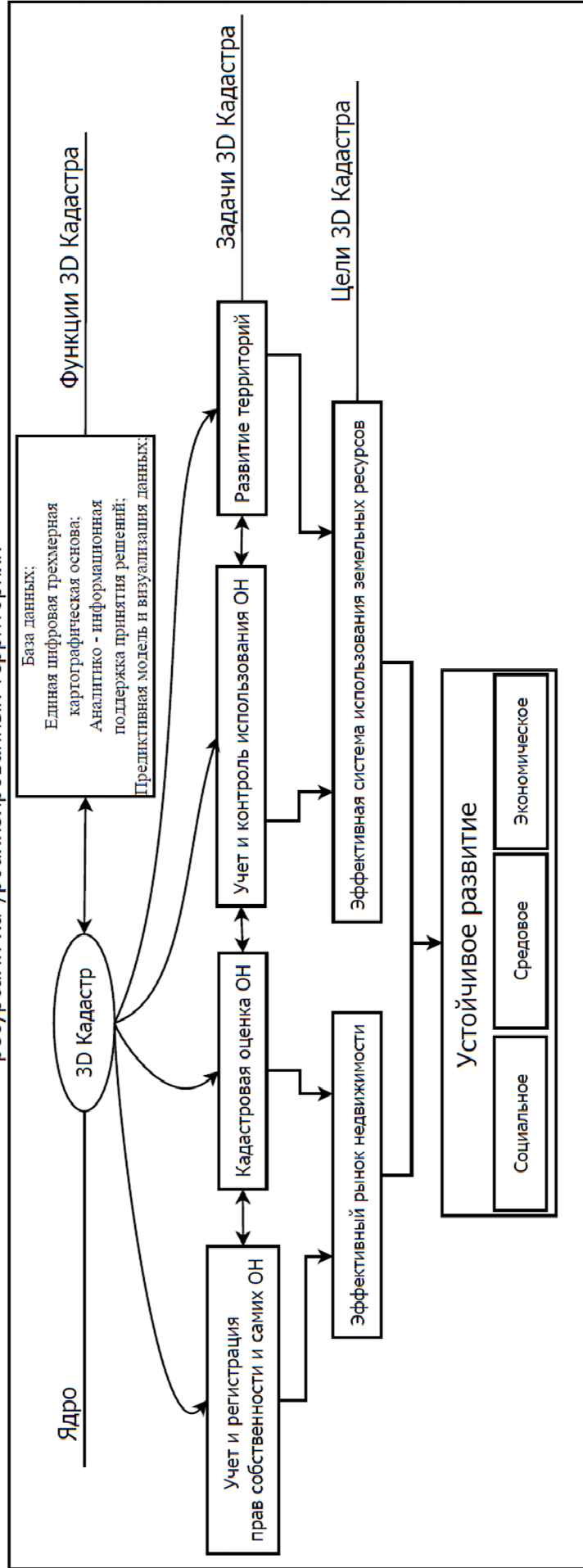


Рисунок 1.25 – Схема парадигмы «3D LAS – "Land Administration System"»

Анализируя предложенную на рисунке 1.25 схему, можно выделить следующие элементы, присущие только 3D-кадастру, рассматриваемому как базис для введения парадигмы трехмерной системы управления ресурсами на урбанизированных территориях.

1 Корректный учет и регистрация правовых пространств в трехмерном представлении приведет к заметному росту прозрачности на рынке недвижимости и упростит контроль за использованием ресурсов.

2 Использование трехмерных цифровых моделей ОН с фотореалистичной детализацией повысит точность и объективность кадастровой оценки, что положительно скажется на рынке недвижимости и инвестиционной привлекательности.

3 Сплошное моделирование городских пространств позволит сделать проекты развития территорий более проработанными и согласованными со смежными районами, существующей инфраструктурой и уменьшит количество коллизий, проектных и кадастровых ошибок.

4 Рациональная организация урбанизированных территорий на основе аналитико-информационных продуктов и предиктивных моделей позволит повысить эффективность управленческих решений, что благоприятно скажется на социальном, экологическом и экономическом развитии городских пространств.

Отдельно отметим цели парадигмы трехмерной системы управления земельными ресурсами на урбанизированных территориях (3D LAS), которые заключаются в достижении международно одобряемых ценностей в областях социального, экологического и экономического устойчивого развития городских пространств. Актуальность исследования подтверждается наличием утвержденного паспорта национальной программы «Цифровая экономика РФ» [65], в приоритетные направления которой входят:

– развитие информационной инфраструктуры для обеспечения потребностей граждан, бизнеса и власти (в том числе работа с геопространственными данными и развитие «умных городов»);

– цифровое государственное управление через платформенные решения оказания услуг гражданам, субъектам малого и среднего предпринимательства.

Складывающиеся сложные земельно-имущественные отношения в пространстве больше не могут быть однозначно отображены в виде плоской проекции на 2D-карте. Усложнившееся землепользование, особенно в городских центрах, привело к плотному строительству со сложными структурами с переплетенными взаимосвязями. Кроме того, растет число туннелей, подземных объектов и инфраструктурных сетей (например, вода, газ, электричество, телефон, Интернет и др.), которые сами не принадлежат владельцу непосредственного земельного участка, использованного для размещения объекта учета [181, 93].

Существующий общественный запрос на смену парадигмы хозяйствования в особенно динамичных территориях получил свое отражение в научно-исследовательской деятельности по всему миру. В России этому вопросу также уделяется внимание, но на данный момент отсутствует проработанная технология информационного обеспечения принятия качественно иных управленческих решений относительно городских территорий и не хватает методико-технических рекомендаций по сбору таких данных.

Следовательно, можно считать обоснованным концентрацию своих усилий в рамках данной работы на анализе существующих способов получения единых геопространственных моделей городов и отдельных территорий с применением современного геодезического оборудования и программных средств для информационного обеспечения 3D-кадастра как ядра будущей 3DLAS городов России следует. Следует сформулировать законченные рекомендации по технологии сбора, обработке и предоставлении геопространственной информации для целей цифровой экономики, цифрового землеустройства и трехмерного кадастра объектов недвижимости, которые создадут геодезически обоснованный фундамент для трехмерной системы управления земельными ресурсами городских территорий.

Выводы по первому разделу

Опираясь на отечественный и международный опыт, результаты пилотных проектов по 3D-кадастру в России и изучив предсказываемую перспективу развития населенных территорий, сформулируем следующие выводы по первому разделу.

1 В международной практике исследовательский интерес имеет четкий акцент на вопросах организации инфраструктуры геопространственных данных для предоставления конечному пользователю результатов сбора, анализа и их обработки.

2 Большое внимание уделяется вопросам правового регулирования третьего измерения при учете недвижимого имущества и возникающим следом вопросам автоматизированного поиска коллизий правовых и физических пространств, вопросам валидации разнородной информации.

3 В отечественной практике уже имеется опыт проведения пилотного проекта по созданию 3D-кадастра и разработана концептуальная модель кадастрового профиля страны LADM согласно международному стандарту FIG (ISO19152).

Также стадию развития отечественной мысли можно охарактеризовать как более акцентированную на методиках и технологиях информационного обеспечения отдельных объектов, чья сложность требует трехмерного моделирования.

4 Все источники по вопросам создания трехмерных моделей ОН для целей кадастра описывают уникальные методики, имеющие технические или экономические ограничения, не подразумевающие масштабирование и автоматизацию.

Ни в одном из источников не идет речи о проведении сплошного моделирования территорий, то есть повторяется ошибка заявительного, точечного кадастра, который имеется на данный момент в стране.

5 В отечественных источниках не уделяется внимания глобальной картине развития городских территорий, как требующих, в первую очередь, улучшения в вопросах проектного управления и устойчивого развития путем создания трехмерной системы управления земельными ресурсами, по аналогии с опытом многих стран.

6 Выделены основные элементы, присущие будущему 3D-кадастру, рассматриваемому как базис для введения парадигмы трехмерной системы управления ресурсами на урбанизированных территориях.

7 Исследование и разработка технологии информационного обеспечения трехмерной системы управления земельными ресурсами на базе международного опыта и отечественных наработок выглядит как насущная проблема современности.

Актуальность данной тематики подтверждается многими государственными национальными и региональными актами и программами по повышению уровня информатизации и эффективности управления земельными ресурсами.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ТРЕХМЕРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

2.1 Исследование форматов LADM, CityGML, IFC и возможности их взаимодействия для 3D-моделирования городского пространства

В последние годы в международной практике виртуальные 3D-модели городов широко использовались в таких прикладных областях, как городское планирование, моделирование окружающей среды и управление стихийными бедствиями. По мере ускорения урбанизации городская среда уплотняется, следовательно, пространственное отображение, анализ и учет требуют расширения традиционной кадастровой системы, основанной на двумерном представлении объектов недвижимости и RRR, что также подкрепляется увеличивающимся интересом органов власти и частных компаний. Так происходит, потому что, с одной стороны, интеграция может улучшить визуализацию правовых данных и способствовать эффективному кадастровому менеджменту городских пространств. С другой стороны, она может обогатить саму кадастровую базу данных 3D-моделями городов и дополнительно улучшить пространственный анализ. Учитывая это и опираясь на выводы первого раздела, а также подробный аналитический обзор литературы представленный в работе [84], можно судить о необходимости выработки практического решения для представления трехмерных кадастровых данных в совокупности с методами пространственного моделирования и классификации ОН, подлежащих моделированию конкретными геодезическими способами.

Выделенные в первом разделе, как наиболее значимые тематики IFC, CityGML и LADM будут подробно изучены в этом разделе. Приведенные форматы представления данных применяются к BIM, трехмерным моделям городов и полю правовой-кадастровой информации. Несмотря на то, что и IFC, и CityGML представляют здания и строительные объекты с физической точки зрения, вопрос взаимообмена между форматами требует отдельных исследований, так как определения строительных объектов между ними различаются. А поскольку LADM моделирует ка-

дастровую информацию в виде юридических пространств, необходимо рассмотреть разработки в части объединения концепций пространств и сравнить с текущим вектором развития кадастровой системы РФ.

Здесь важно сформулировать основной запрос к подобному интегрированному методу представления городского пространства. Подразумевается, что помимо физических характеристик и топологической достоверности моделей трехмерное пространство должно быть насыщено правовой информацией, то есть физические объекты должны быть поделены на правовые пространства согласно кадастровым данным и предоставлять инструменты для эффективного функционирования системы управления земельными ресурсами в городе (3D LAS). Трехмерные кадастровые системы предназначены для обеспечения полностью интегрированного трехмерного отображения юридических границ и прав, ограничений и обязанностей (RRR), которые согласуются с физической реальностью.

В сфере управления земельными ресурсами модель (LADM) – это международный стандарт, включающий фундаментальные и независимые от юрисдикции концепции, необходимые для моделирования юридических границ и информации о RRR [158, 171]. LADM предоставляет общую онтологию для облегчения обмена информацией о земле и собственности в пределах юрисдикции или среди разных юрисдикций (ISO19152, 2012).

Концептуальная сущность LADM обеспечивает гибкость благодаря утилизации этого стандарта через имплементацию широкого спектра подходов, базирующихся на профилях стран, каждый из которых специфичен для отражения правил и требований конкретной юрисдикции. Существующая литература указывает на то, что жизнеспособность LADM для трехмерного цифрового кадастра многократно исследовалась применительно к разным юрисдикциям по всему миру [159].

Этот список включает юрисдикции таких стран, как Бразилия [176], Китай [102, 157, 104], Чехия [150], Хорватия [147, 163, 214, 205], Греция [141, 152, 154], Израиль [189, 213], Корея [134, 145], Сербия [204, 177, 178], Малайзия [129, 101, 207, 218, 199], Нидерланды [192, 190, 179, 174], Польша [200, 140], Россия [89, 132],

Тринидад и Тобаго [142], Турция [100, 111, 174], Австралия [122, 107], Швеция [118, 136, 194].

Хотя LADM предоставляет исчерпывающий набор сущностей для моделирования юридических концепций, физические элементы могут быть связаны с сущностями LADM извне. Рассмотрим подробнее внутреннюю структуру концептуальной модели сферы управления земельными ресурсами (Land Administration Domain Model – LADM, ISO 19152), поскольку в ней лучше всего разработан инструментарий, позволяющий представлять юридические пространства на основе кадастровой информации. Тем более, что, как было отмечено в первом разделе, концепция принята для РФ.

LADM состоит из четырех пакетов, представленных на рисунке 2.1:

- 1) пакет Party Package;
- 2) административный пакет;
- 3) пакет пространственных единиц;
- 4) пакет Surveying and Representation (ISO19152, 2012).

Эти четыре пакета отражают взаимодействие вовлеченных агентов, RRR, пространственные сущности и их геометрию.

LA_Party – это основной класс пакета агентов, который определяет участников, таких как люди или организации, участвующие в управлении земельными ресурсами. LA_Party может быть связан с нулем или более LA_RRR и LA_BAUnit, которые являются двумя различными классами, принадлежащими административному пакету.

LA_RRR используется для моделирования различных типов RRR, в которых право может даваться собственнику ОН для определенных целей, например, использовать некоторые другие ОН других владельцев, таких как дороги, мосты и проезды для полной реализации своего вещного права – фактически это выражение обременения права собственности (сервитут, суперфиций).

LA_BAUnit – это базовые административные единицы, которые можно разделить на несколько пространственных единиц, принадлежащих агенту с одинаковыми LA_RRR [101].

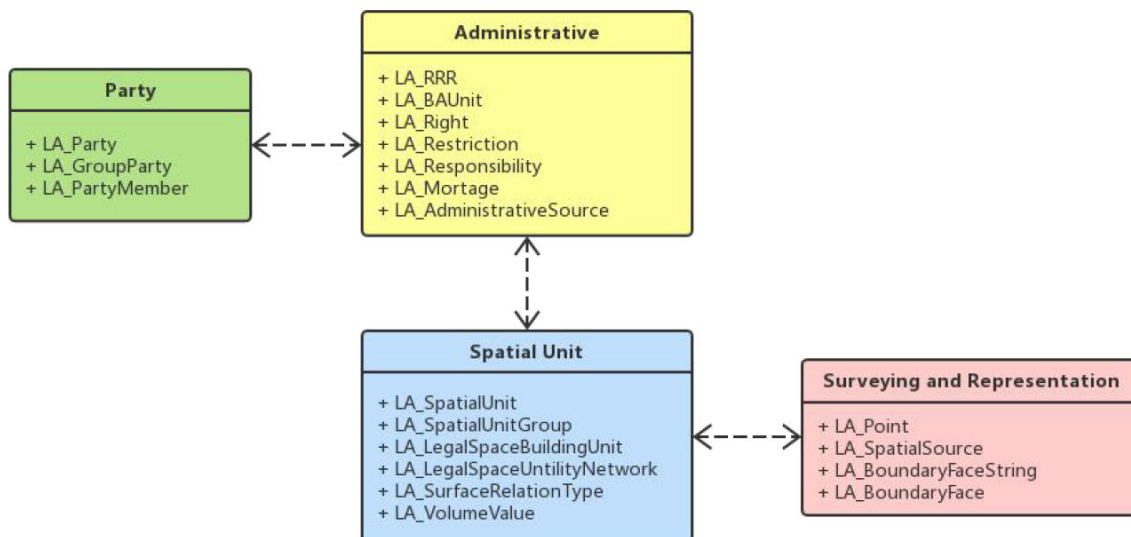


Рисунок 2.1 – Четыре пакета модели области управления земельными ресурсами (LADM)

Определение LA_BAUnit аналогично определению класса Building в CityGML. На рисунке 2.2 показаны отношения между LA_Party, LA_Right, LA_BAUnit и LA_SpatialUnit, где LA_BAUnit «10013» содержит четыре пространственных единицы, и все они принадлежат агенту «FarmerPekka» с одинаковыми правами.

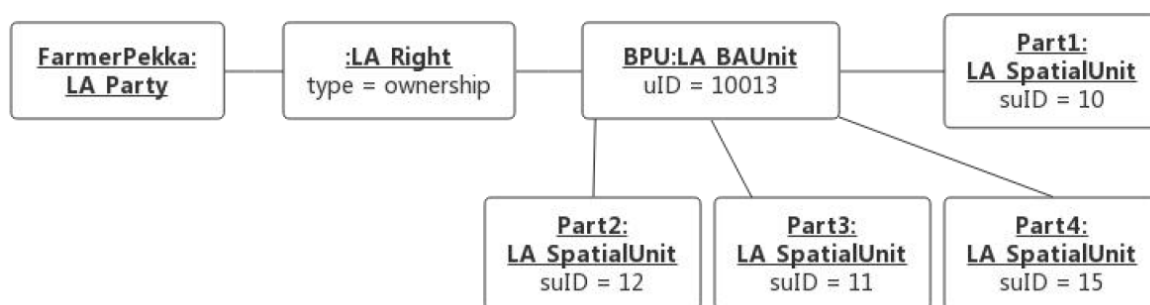


Рисунок 2.2 – Пример для отображения отношений между основными объектами собственности (адаптировано из ISO 19152, 2012, приложение C)

Что касается пакета Spatial Unit, он включает два основных класса – LA_SpatialUnit и A_LegalSpaceBuildingUnit. LA_SpatialUnit содержит различные

пространственные представления вещных притязаний, и его можно сгруппировать в LA_SpatialUnitGroup или разбить на пространственные субъединицы.

Согласно функции пространственной единицы, LA_SpatialUnit также можно разделить на две спецификации: A_LegalSpaceBuildingUnit и LA_LegalSpaceUtilityNetwork (ISO19152, 2012). LA_LegalSpaceBuildingUnit определяет строительную единицу с юридическими пространствами, которые могут использоваться для различных целей (например, жилые или коммерческие), где здание или его часть не эквивалентно физическому разделению, что может в перспективе использоваться в качестве моста для соединения LADM с CityGML3.0 [101]. Его атрибут BuildingUnitID или suID, унаследованный от LA_SpatialUnit, можно использовать для связывания правового пространства с физическими элементами.

Оставшийся подпакет «Съемка и представление», который в основном используется для отображения результатов сбора пространственных данных из разных источников, также представляет геометрию и топологию, об этом сказано в работе [158].

Три ключевых элемента LA_Point, LA_BoundaryFaceString и LA_BoundaryFace могут использоваться для моделирования границ пространственных сущностей с учетом требований различных юрисдикций и требований различных агентов. Например, двухмерные пространственные сущности (участки) и трехмерные пространственные сущности (здания) могут быть представлены как LA_BoundaryFaceString и LA_BoundaryFace, соответственно (ISO19152, 2012). На рисунке 2.3 показана взаимосвязь между этим пакетом и пространственной единицей.

Но поскольку LADM является концептуальной схемой представления кадастровых данных, необходимо проследить возможность ее интеграции с методами моделирования самих физических пространств.

3D-моделирование городов – это надежное решение для отражения характеристик сложной городской среды, поскольку набирающие популярность трехмерные модели городов или, как их недавно стали называть, «цифровые двойники», связывают виртуальный мир и физическую реальность, в достаточной степени от-

ражая пространственные взаимоотношения на основе данных о различных аспектах объектов [210].

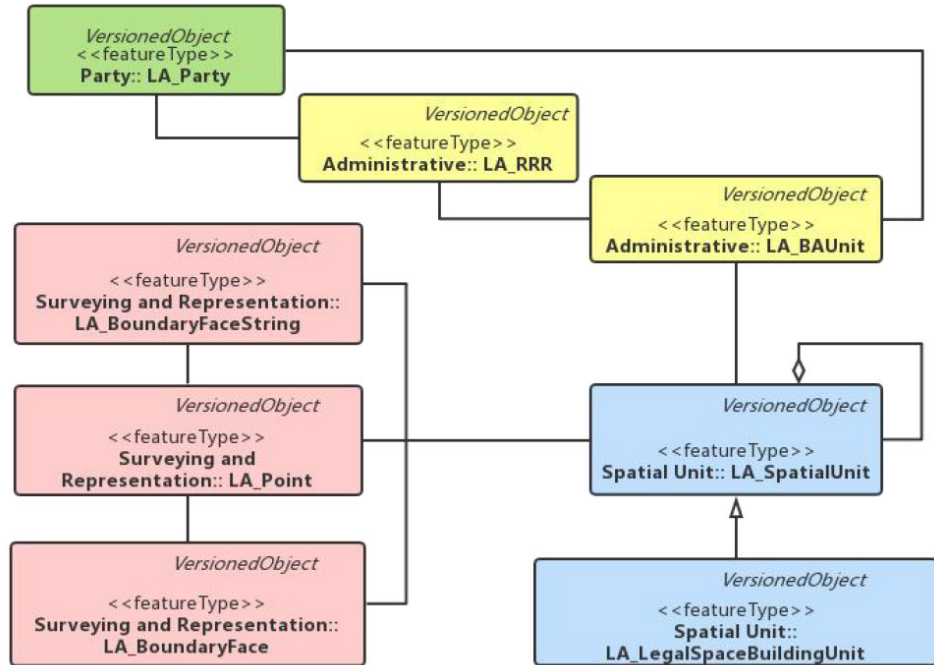


Рисунок 2.3 – Блок-схема отношений между разными пакетами с их базовыми классами

Согласно [90] и [105], в настоящее время технологии сбора, хранения и управления 3D-данными стали зрелыми, и общее использование таких данных возрастает. Положительное влияние 3D-моделирования оценивалось экспертами и учеными для множества приложений. Тем не менее, из-за стремительной эволюции методов 3D-моделирования и их приложений, связанных с городским хозяйством, отображением и обработкой, существует необходимость во всестороннем изучении с упором на сравнительный анализ методов 3D-моделирования. Наиболее актуальный анализ как раз был проведен в работе [94], а также по отдельным подходам автором рассмотрены работы [155, 96, 193, 110, 115, 183, 108, 77, 182, 160]. Далее предлагается сложившаяся в мировой практике классификация различных методов трехмерного моделирования и сравнительный анализ их сильных и слабых сторон.

Актуальные подходы к моделированию принято делить на два принципиальных типа – топологическое моделирование и геометрическое моделирование. Под топологическим моделированием подразумевается построение моделей, имеющих только внутреннюю согласованность, и взаимосвязь смежных частей модели, состоящих из простейших компонентов (узел, дуга, грань, тело) и их сочетаний. В моделях такого типа содержится информация не об абсолютных координатах, а об относительном расположении каждого компонента друг от друга.

Преимуществом такого подхода является постоянство отношений частей модели внутри самой модели, что сокращает избыточность информации и способствует сохранению внутренней структуры модели, также позволяя выполнять сложные пространственные запросы, применять операторы и анализировать модели [155, 96].

На данный момент наиболее популярным методом топологического моделирования является язык разметки городской географии City Geography Markup Language (CityGML), созданный открытым геопространственным консорциумом Open Geospatial Consortium (OGC). CityGML – это широко известный стандарт в геопространственной области для обеспечения функционально совместимого обмена трехмерными городскими информационными моделями [168, 143]. По сути это формат, базирующийся на XML–схеме, и модель организации данных для хранения, доступа и обмена географической, топологической и семантической информацией в трехмерном представлении. Указанный факт также согласуется с исследованиями первого раздела. Наиболее подробное описание базовых возможностей CityGML и его структуры изложено в работах [198, 91].

CityGML – важная спецификация открытого стандарта, используемая в 3D ГИС для отображения трехмерных моделей городов, которая определяет классы и отношения соответствующих объектов в городах с учетом их геометрических, топологических, семантических свойств [169, 97, 175].

Новая версия CityGML3.0, согласно описанию, содержит ряд улучшений, расширений и ряд новых функций. Среди них – изменения уровней детализации (LoD)

и изменения структуры подхода – два важных улучшения по сравнению со старой версией. В CityGML3.0 все объекты могут быть представлены на пяти различных четко определенных уровнях детализаций Level of Details (LoD) которые схематично представлены на рисунке 2.4.

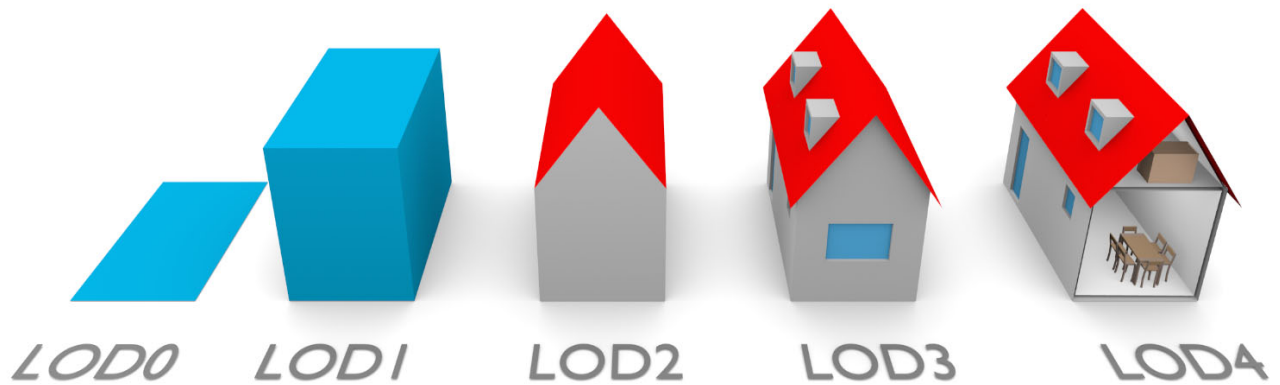


Рисунок 2.4 – Схематическое представление уровней детализации LoD в CityGML3.0 [229]

Важно проанализировать улучшение структуры CityGML3.0, которая состоит из двух компонентов – ядро подхода и модули тематического расширения. Согласно работе [115] ядро структуры CityGML можно расширить с помощью дополнительных атрибутов и типов объектов, чтобы обеспечить представление, управление и анализ трехмерных моделей городов для широкого спектра приложений. Ядро подхода определяет основные концепции и компоненты модели данных CityGML, а модули тематического расширения определяют конкретное тематическое поле 3D-моделей города. На рисунке 2.5 показана UML-схема концепции класса Space, которая является одной из частей нового ядра подхода, где все пространственные представления перефразированы на основе классов AbstractSpace и AbstractSpaceBoundary в CityGML3.0, а не связаны напрямую с классами геометрии. Это в некоторой степени упрощает обработку геометрии в CityGML.

Класс AbstractSpace в CityGML3.0 можно разделить на два подкласса: AbstractPhysicalSpace и AbstractLogicalSpace. На рисунке 2.6 показан один из темати-

ческих модулей под названием Building Module в CityGML3.0, который позволяет отображать тематические и пространственные аспекты здания, части зданий, строительные конструкции и внутренние конструкции с четырьмя уровнями детализации.

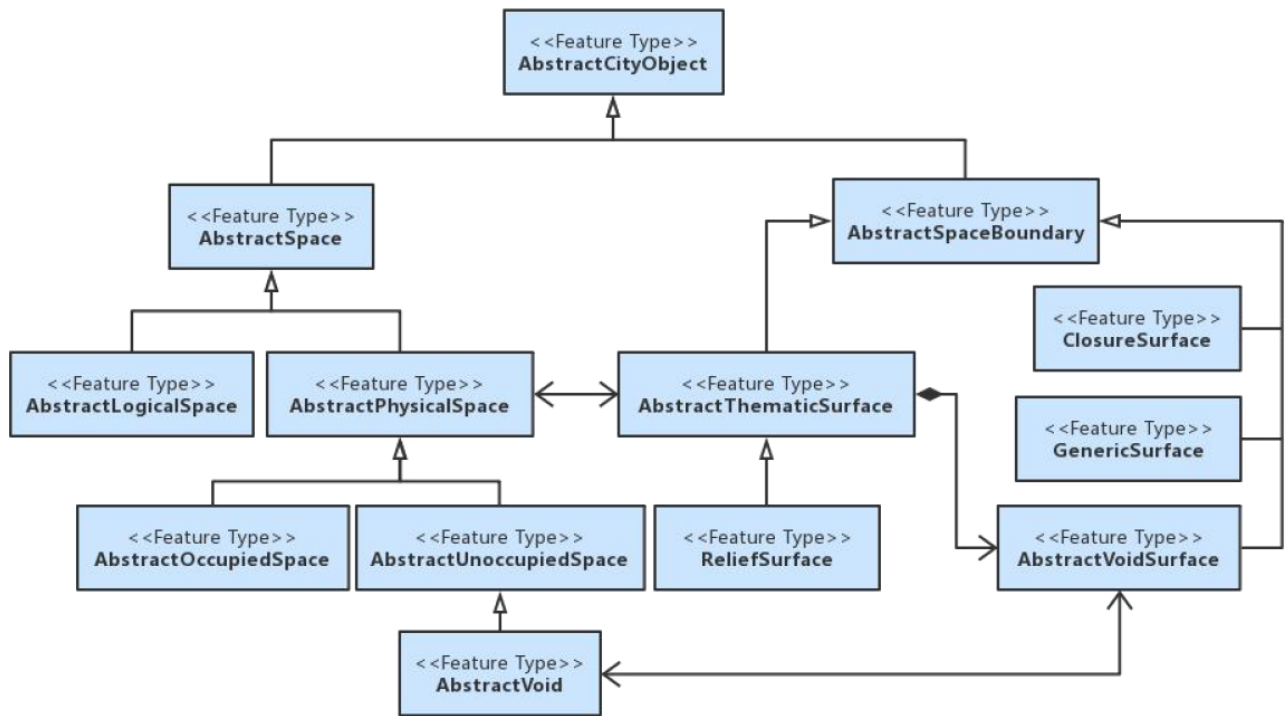


Рисунок 2.5 – UML-схема концепции класса Space в CityGML3.0

Согласно классификации AbstractSpace, классы в модели здания рассматриваются с физического и логического аспектов.

С физической точки зрения одним из основных подклассов AbstractPhysicalSpace является ConstructionSpace, из которого могут быть получены Building и BuildingPart (см. рисунок 2.6).

Здание в CityGML представляется гомогенной сущностью. Если оно состоит из структурных сегментов, различающихся этажностью или типом крыши, здание следует разделить на одну или несколько дополнительных сущностей (частей здания). С логической точки зрения AbstractLogicalSpace – это новое понятие в CityGML3.0, используемое для моделирования пространств, которые не ограни-

чены физическими объектами, а определены в соответствии с юридическими соображениями, см. границы вещного права.

BuildingUnit, как один из подклассов BuildingSubdivision, представляет собой сущности квартир и общественных мест внутри сущности зданий. Между тем, BuildingStoreys воспринимается как логическое, а не физическое подразделение, потому что границы плит в построенном здании натурно точно определить затруднительно.

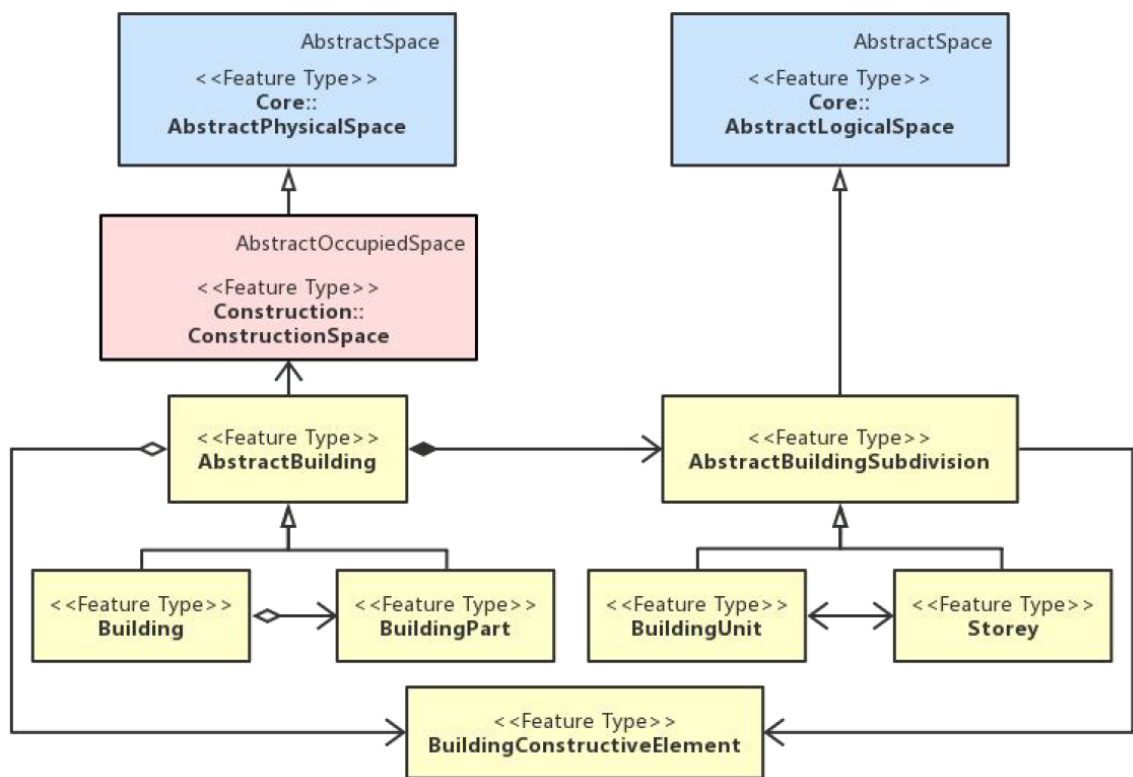


Рисунок 2.6 – UML-схема модуля Building в CityGML3.0

С помощью LogicalSpace, предложенного в актуальной версии CityGML, объединение трехмерных моделей городов с кадастровыми моделями на основе LADM будет в значительной степени упрощено благодаря еще одному новому классу в модуле строительства – BuildingConstructiveElement. Он поддерживает отображение конструктивных элементов из наборов данных BIM (например, IfcWall, IfcRoof, IfcSlab и т. д.) в сущностях, привычных для 3D-моделей городов CityGML.

Помимо представления абстрактных пространств с новыми определениями, геометрические границы в CityGML3.0 также были реструктурированы. Как показано на рисунке 2.7, поверхности `RoofSurface`, `GroundSurface`, `FloorSurface` и другие объекты являются производными от `ConstructionSurface`.

На данном этапе стоит отметить, что рассмотренные выше изменения, введенные в новую ревизию открытого стандарта CityGML3.0, направлены в первую очередь на удовлетворение растущей потребности в улучшении взаимодействия (интероперабельности) с другими спецификациями и форматами, применяющимися в последние годы в мировой практике для отображения трехмерной пространственной информации на урбанизированных территориях.

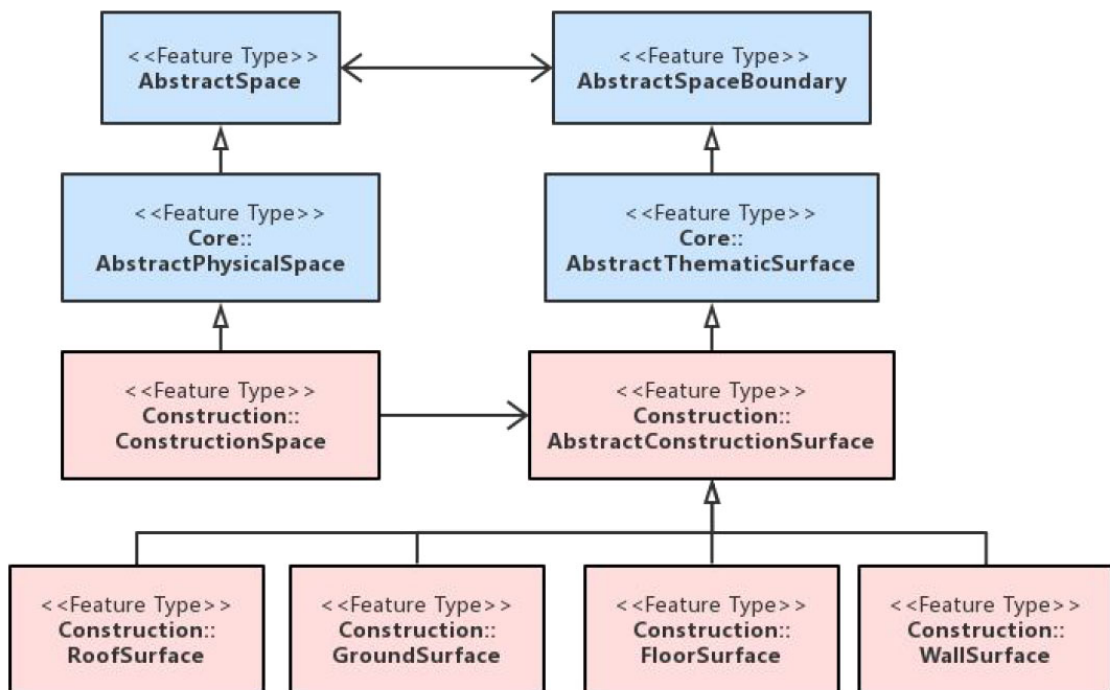


Рисунок 2.7 – UML-схема границ поверхностей в CityGML3.0

Очевидно, применение этого метода моделирования и его расширений со временем позволит достичь все более полного охвата многообразия возникающих сложных ситуаций организации городских пространств, что в свою очередь приблизит переход кадастровых систем к 3D-представлению данных и имплементацию 3D LAS.

Существуют также другие топологические методы моделирования, но их реализация не встречается в работах за последние 5 лет, ранее весьма полно эти методы были описаны в работе [217].

Второй тип моделирования – геометрический, обладает непосредственным преимуществом в виде наличия абсолютных координат местоположения объектов. Однако, он не поддерживает смежные топологические взаимосвязи, поэтому согласованность данных становится проблемой при изменении координат.

Существующие широко используемые методы геометрического моделирования можно разделить на категории по примитивным компонентам, используемым для представления 3D-модели (рисунок 2.8):

- точка: неструктурированный набор точек (облако точек);
- линия: каркасное моделирование;
- поверхность: 2.5D, триангуляционная нерегулярная сеть;
- тело: воксель, граничное представление (Boundary-representation), конструктивная твердотельная геометрия (CSG), параметрическое представление;
- моделирование на основе изображений.



Рисунок 2.8 – Примеры геометрических методов моделирования
(адаптировано из работы [210])

Обратим внимание на некоторые из перечисленных методов.

Неструктурированный набор точек, или так называемые облака точек, представляют собой по сути независимые и разрозненные скалярные поля. Такие данные можно получить с помощью технологии обнаружения и определения дальности (LiDAR) или методов плотного сопоставления изображений, основанных на изображениях, полученных с разных платформ, таких как беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с различными сенсорами. Согласно работам [109, 146, 120, 186, 95], такой метод предоставляет современные трехмерные изображения с высоким разрешением и точностью в пределах области исследования. Неструктурированные точки могут быть связаны в нерегулярные триангуляционные сети для отображения цифровой модели поверхности (DSM) и пригодны для построения пространственных моделей зданий (BIM).

Неструктурированные поверхности (mesh) – это совокупность вершин, рёбер и граней, которые определяют форму объекта. Гранями обычно являются треугольники, четырёхугольники или другие простые выпуклые многоугольники (полигоны). В частном случае процедурного моделирования неструктурированные поверхности могут создаваться посредством алгоритмов и правил «выдавливания» трехмерных блоков из двумерных данных с дополнительными атрибутами. На данный момент согласно работам [88, 92] 2.5D-данные служат большей частью входными данными для 3D-кадастра в виде 2D-контуров с единообразной информацией о высоте или в качестве базовой геоинформации для процедурного моделирования.

К параметрическим методам моделирования относят также метод информационного моделирования зданий (BIM), который может считаться наиболее продвинутой разработкой в отношении методов геометрического моделирования за последнее время. Этот метод может быть интегрирован с трехмерной базой данных для использования информации, относящейся к зданиям, на основе стандарта Industry Foundation Classes (IFC) (ISO16739, 2013), говорится в работе [135].

IFC – это известный стандарт, используемый в BIM, который описывает здание в отношении его геометрических и семантических свойств с использованием

физических пространств, таких как комнаты, коридоры, а также стены. В качестве пространственной модели здания, применяемой в отрасли архитектуры, проектирования и строительства (Architecture, Engineering, Construction – АЕС), BIM содержит подробные сведения о проекте и его изменениях, строительных конструкциях, конструктивных и инфраструктурных элементах здания, пространствах, графиках и сметах, также, как и вообще о всех аспектах строительного проекта на протяжении всего жизненного цикла проекта от идеи до сноса (рисунок 2.9).

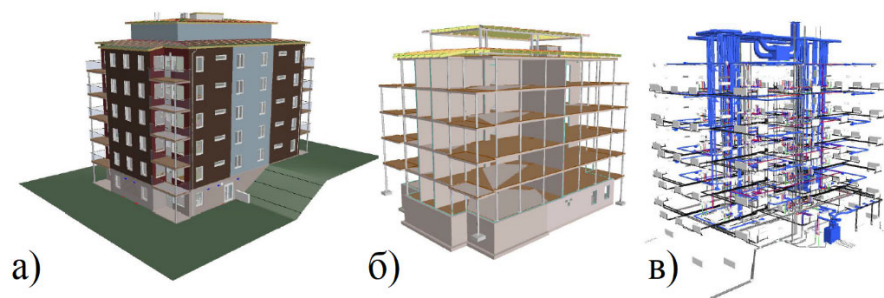


Рисунок 2.9 – Пример BIM-модели (а), состоящей из основных строительных конструкций (б) и инженерной инфраструктуры (в)

Как уже было сказано, одной из наиболее важных спецификаций, используемых в BIM, является IFC, который определяет данные, необходимые для зданий на протяжении всего жизненного цикла.

В качестве открытого стандарта IFC позволяет обмениваться множеством данных и совместно используется программными приложениями АЕС (ISO 16739, 2013). Согласно спецификации, разработанной buildingSMART, иерархия объектов IFC представлена на рисунке 2.10.

Как показано на рисунке 2.10, IfcRoot является наиболее абстрактным классом для всех сущностей в IFC. Три его основных компонента: IfcObjectDefinition, IfcPropertyDefinition и IfcRelationship – соответственно обобщают физически осязаемые элементы, характеристики объектов и отношения между объектами. Как один из подтипов IfcObjectDefinition, IfcProduct не только определяет физические элементы через геометрический и пространственный аспект, но и описывает нефиз-

зические элементы. Его компоненты `IfcElement` и `IfcSpatialElement` в основном используются для представления сущностей геометрического аспекта и пространственных контекстуальных сущностей.

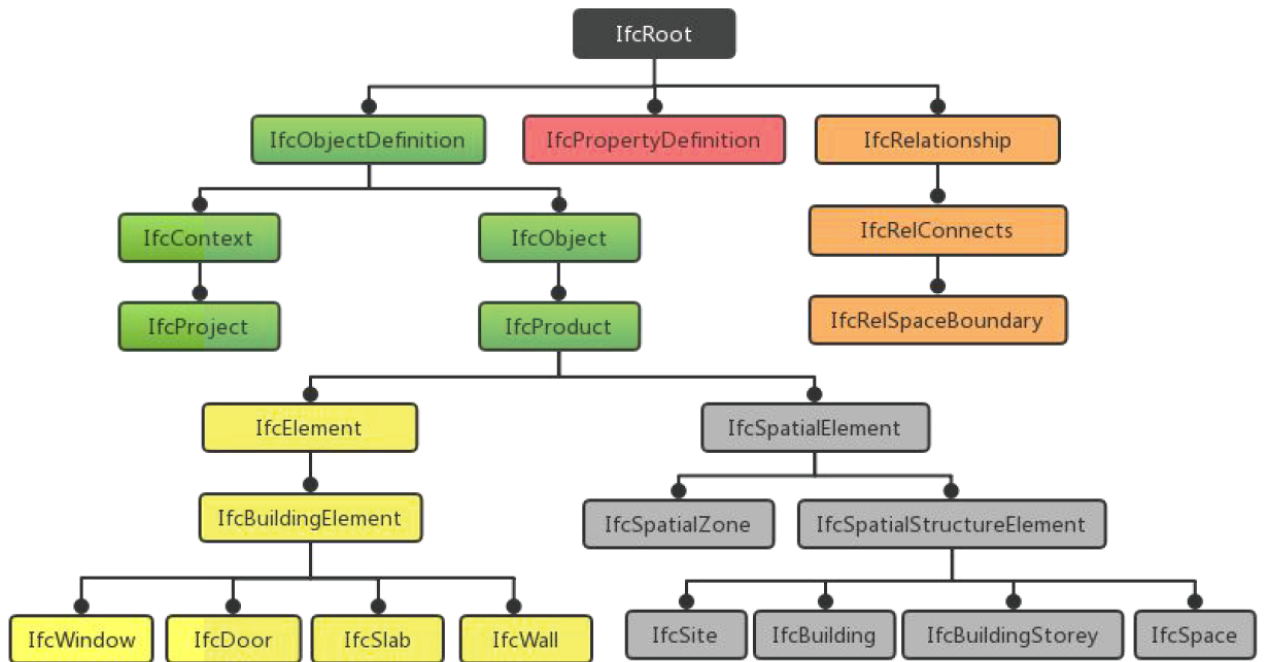


Рисунок 2.10 – Блок-схема иерархии объектов IFC

С геометрической точки зрения `IfcElement` определяет все существующие объекты здания. Его подтип `IfcBuildingElement` представляет все элементы, которые участвуют в строительной системе, такие как окна, двери, перекрытия и стены. Все эти элементы в IFC представлены с помощью твердотельной геометрии.

Рассматривая `IfcSpatialElement` отметим, что этот класс представляет пространственные контекстуальные структуры или пространственные зоны в строительном объекте. Его подтип `IfcSpatialStructureElement` является обобщением всех пространственных элементов, которые могут использоваться для определения пространственной контекстуальной структуры. Кроме того, `IfcSpatialStructureElement` можно разложить на четыре компонента: `IfcBuilding`, `IfcBuildingStorey`, `IfcSite` и `IfcSpace`. Среди них `IfcBuilding` определяется как сооружение, обеспечивающее укрытие для своих жителей в IFC (ISO 16739, 2013). `IfcBuildingStorey` представляет

собой горизонтальную совокупность пространств, связанных вертикально. Согласно семантическому определению `IfcBuildingStorey`, этаж может не только занимать несколько связанных этажей, но его можно также разложить на несколько горизонтальных подчастей. Что касается `IfcSpace`, это подходящий подкласс сущностей для моделирования пространственного выражения юридических границ внутри зданий, о чем подробнее написано в работе [106].

Помимо `IfcObjectDefinition` и `IfcPropertyDefinition`, `IfcRelationship` играет важную роль в соединении BIM с кадастровыми данными, поскольку его подкласс `IfcRelSpaceBoundary` предоставляет семантическую связь между физическими элементами и пространствами, границами, определенными через концепцию LADM. Таким образом закрепляя возможность взаимной интеграции кадастровых данных о правовых пространствах с физическими элементами.

В работе [131] указано, что IFC имеет сходство с CityGML, так как оба метода применяют объектно-ориентированные и стандартизированные алгоритмы для описания данных. Управление земельными ресурсами на основе BIM – это новая область исследований с многообещающими решениями для трехмерного цифрового кадастра, говорится в работе [94].

На данный момент накоплен опыт исследований, посвященных обогащению BIM, в частности стандарта IFC, правовой информацией для различных юрисдикций по всему миру, таких как Австралия, район Виктория [122, 107], Нидерланды [179] и Швеция [118, 136, 194].

Подводя черту рассмотрению классификации и двух наиболее популярных методов моделирования физического пространства урбанизированных территорий, отметим, в первую очередь, возможность взаимной интеграции IFC и CityGML3.0 и высокий уровень интероперабельности при широком спектре вложенных инструментов и приложений указанных методов. Получается, что проведенный анализ публикационной активности в первом разделе данной работы согласовывается с проанализированными преимуществами рассмотренных подходов. Для наглядно-

сти сведем выявленные характеристики для основных методов моделирования в таблицу 2.1.

Для геометрического представления IFC использует структурные компоненты зданий из твердой геометрии, а не B-Rep, используемый в CityGML. Для семантического представления IFC и CityGML с помощью различных сущностей интерпретируют объекты и части здания.

Таблица 2.1

Параметр	CityGML	IFC
Геометрия	Представление с помощью ограничивающих плоскостей	Твердотельная геометрия, границы и булевы операции
Семантика	В зависимости от выбранного уровня детализации модели (LoD)	Множества архитектурных и конструктивных деталей
Визуализация моделей	Отображение широкого набора текстурных свойств	Меньшее текстурное разнообразие, значительно более широкое представление конструктивных материалов
Масштабы моделей	Легко масштабируется от локального крупного отображения до мелкомасштабного представления всей среды	Фокусируется на отдельных зданиях или небольших группах построек
Система координат	Основана на геодезической системе координат и использует картографическую проекцию	Локальная прямоугольная система координат
Применение	Системы управления земельными ресурсами в урбанизированных территориях, логистика, менеджмент, экология	Проектирование, возведение и управление зданиями, сооружениями и инфраструктурой

Например, площадь внутри здания определяется как IfcSpace в IFC, а в CityGML – как сущность «room». Кроме того, поскольку IFC классифицирует элементы более подробно, чем CityGML, некоторые из них должны быть объединены в один класс пространственных объектов для интеграции, например, окна и

двери в IFC заменяются классом пространственных объектов с именем «проемы» в CityGML.

Вопрос объединения двух подходов пока еще не является окончательно закрытым, и различные решения продолжают появляться. Подробное исследование в этом направлении выходит за рамки данной работы, однако важно отметить несколько прорывных работ в этой области и подчеркнуть их значимость. В работе [193] рассматривается на примере проекта по созданию трехмерной модели города и совместной платформы данных для Сингапура технология объединения двух методов с минимизацией потерь. Также есть аналогичные работы по интеграции двух подходов [110, 139, 182, 160, 184, 188, 108]. В работе [183] представлен наиболее подробный разбор автоматизированной конвертации CityGML в формат IFC. Там описывают разработку основных компонентов интеграционной технологии: экспорт из BIM в IFC, автоматическое преобразование из IFC в CityGML с использованием спецификаций ADE, как описанные в работе [115] для обогащения формата CityGML в контексте виртуального Сингапура (рисунок 2.11).

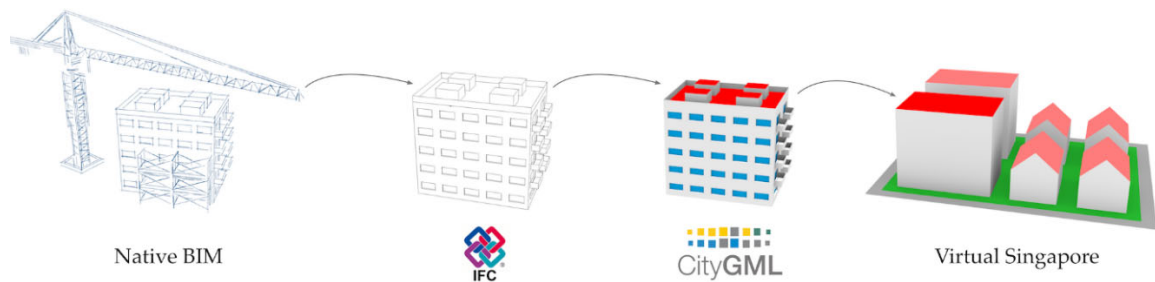


Рисунок 2.11 –Схема проекта из работы [183]: от BIM (Building Information Model) до интеграции моделей CityGML в Virtual Singapore

На рисунке 2.12 приведен тройной граф, который представляет собой пример здания и соответствующую модель города с их пространственной структурой, состоящей из двух зданий, каждое из которых состоит из одного или двух этажей. Объекты моделей IFC и CityGML составляют узлы графа и изображаются в виде прямоугольников, ассоциации или отношения между объектами составляют ребра графа и изображаются в виде линий.

Изученные и проанализированные технологические подходы к представлению физических пространств и юридических границ в наиболее популярных и широко распространенных подходах в мировой кадастровой практике и науке имеют витальное значение для данной работы.

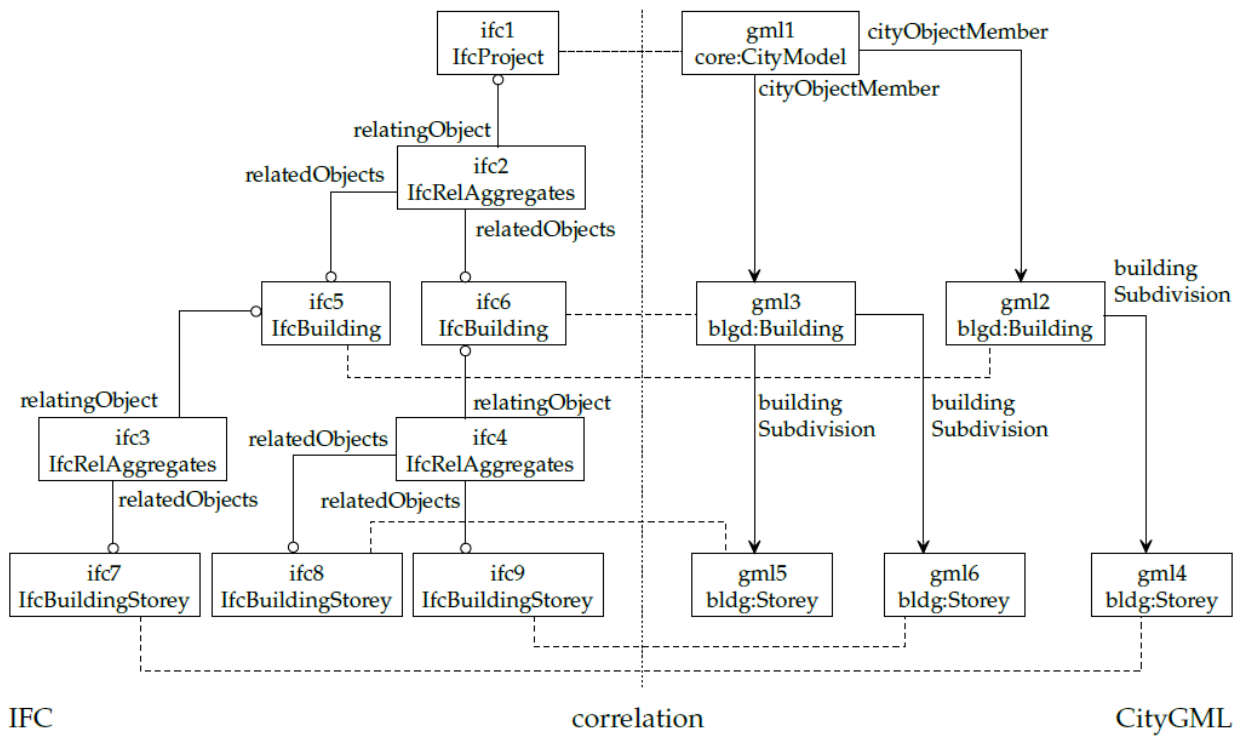


Рисунок 2.12 – Тройной граф, состоящий из схемы IFC (Industry Foundation Classes) (слева, ребра с отметками круга), схемы CityGML (справа, ребра со стрелкой) и корреляционного графа (ребра с пунктирными линиями) [72]

Выделенные в этой работе и подчеркнутые в приведенных источниках различия и особенности подходов к моделированию не являются препятствием для унификации требований к методикам сбора пространственной информации для задач трехмерного кадастра и информационного обеспечения трехмерных систем управления земельными ресурсами на урбанизированных территориях, так как создаваемые для целей кадастра трехмерные модели ОН и городских пространств могут быть почти без потерь конвертированы, как было показано выше. К тому же подробная и продуманная классификация ОН по типу модели и источнику информации может упростить сбор данных для ЕГРН. Поэтому необходимо исследовать возможность симпли-

фикации подхода к моделированию и обработки технических требований-рекомендаций к сбору пространственных данных только для задач 3D-кадастра, но представляемых через указанные широко распространенные форматы данных. Таким образом, возникает необходимость разработки классификации объектов недвижимости в согласии с технологическими возможностями форматов представления данных. Происходит выделение отдельных групп объектов, представляемых через форматы BIM и отдельно через форматы CityGML, а также группы переходных объектов, модели которых могут быть реализованы в обоих форматах в зависимости от конкретной ситуации. Действительное значение технической реализации будет иметь функцию методологического фундамента к построению систем трехмерного кадастра и управления земельными ресурсами поскольку, как было показано ранее, кадастровая система рассматривается как ядро для развертывания более глобальной цифровой структуры городского управления. Следовательно, геодезический грамотный подход должен позволить задать строгий и однозначный геопространственный базис для «навешивания» новых слоев семантической, атрибутивной и другой информации по мере развития технологий и развертывания компьютерной инфраструктуры.

Таким образом, из рассмотренных выше моментов вытекает логичная необходимость разработать типологическую классификацию ОН, которые следует моделировать с использованием приведенных форматов и типов данных, определить требования к таким моделям с точки зрения трехмерного кадастра и трехмерной системы управления земельными ресурсами на урбанизированных территориях.

2.2 Исследование и выработка классификации объектов недвижимости для представления в 3D-кадастре и 3DLAS

В разработанном национальном профиле концептуальной модели трехмерного кадастра, основанного на стандарте ISO 19152 LADM, рассматривается 5 видов объектов недвижимости:

- 1) земельные участки;
- 2) здания;

- 3) помещения;
- 4) сооружения;
- 5) объекты незавершенного строительства.

Однако в кадастровой практике Российской Федерации на данный момент на учет ставятся следующие виды ОН:

- 1) земельные участки;
- 2) здания;
- 3) помещения;
- 4) сооружения;
- 5) объекты незавершенного строительства;
- 6) машино-места;
- 7) единые недвижимые комплексы;
- 8) предприятие как имущественный комплекс.

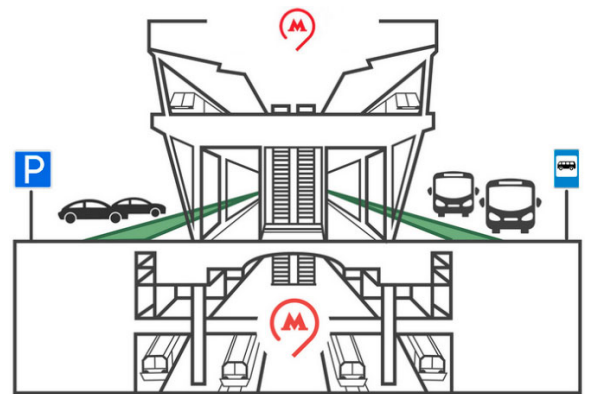
В рамках рассматриваемой концепции можно присвоить ОН типа машино-место индекс помещения, границами которого назначить промеры длины, ширины и высоты, отводимые для паркинга автотранспорта. В случае с едиными недвижимыми комплексами и предприятиями, как имущественные комплексы, важно рассмотреть особенности оформления правовых пространств и юридических ограничений. В этом случае такое исследование выходит за рамки данной работы.

Опираясь на существующий международный кадастровый опыт и учитывая отечественную практику, разработаем классификацию ОН, требующих трехмерного моделирования, для представления в 3D-кадастре и трехмерной системе управления земельными ресурсами. Несмотря на то, что в российской практике вопрос интеграции BIM-технологий в кадастр недвижимости пока не проработан досконально, зарубежный опыт свидетельствует о необходимости развития в этом направлении [88, 76, 108, 75, 76, 74, 123]. Поэтому в первую категорию объектов, требующих трехмерного отображения в 3D-кадастре, отнесем все объекты, построенные с применением технологий BIM, а для учета объектов более раннего периода постройки пропишем определение первой категории ОН.

Таким образом, к **первой категории** объектов недвижимости на урбанизированных территориях отнесем объекты сложной внутренней инфраструктуры и высокой функциональной значимости для всех систем города. На рисунке 2.13 показаны объекты высотного строительства, транспортно-пересадочные узлы, промышленные комплексы, объекты подземного залегания, отказоустойчивые объекты инженерной инфраструктуры и др. Объекты первой категории должны быть моделированы в соответствии с требованиями стандартов BIM-проектирования, их цифровой двойник должен обеспечивать исчерпывающее представление о функционировании реального объекта и его взаимосвязях с другими объектами и входить в будущий 3D-кадастр РФ на основании стандартов IFC и разрабатываемых требований к информационным моделям.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.13 – Примеры объектов первой категории:

а) высотное строительство; б) транспортно-пересадочный узел; в) отказоустойчивые объекты инженерной инфраструктуры; г) объекты подземного залегания

Ко **второй категории** объектов недвижимости на урбанизированных территориях отнесем объекты инженерных сетей и малые отказоустойчивые узлы инженерной инфраструктуры, такие как газо- и электрораспределительные подстанции, малые транспортно-пересадочные узлы, мосты, эстакады и др., а также общественно-культурные объекты с большим человеко-потоксом, имеющие меньшую степень функциональной важности для всего города и более простую внутреннюю инфраструктуру, поэтому для их моделирования стоит использовать смешанный подход, исходя из экономического обоснования: для тех объектов категории, для которых уже имеется BIM-модель, использовать в кадастре ее, а для всех остальных создавать TIN-модель под формат CityGML на уровне детализации LOD4.

Третья категория объектов недвижимости на урбанизированных территориях содержит объекты жилищно-коммунального хозяйства, сам жилой фонд, индивидуальное жилищное строительство (ИЖС) (с августа 2018 г. требуется корректное определение высоты такого объекта), коммерческую недвижимость, апартаменты, имущественные комплексы, отдельные совокупности объектов, обладающие пересечениями собственных контуров и/или с другими объектами на разных высотах, объекты культурного наследия, дорожную сеть, рекреационные территории (лесопарковые зоны, городские насаждения) и др., часть из них представлена на рисунке 2.14.



a)

б)

Рисунок 2.14 – Примеры объектов 3 категории: *a)* лесопарковые зоны, городские насаждения; *б)* жилой фонд, ИЖС

Такие объекты и пространства, скорее всего, являются наибольшей по совокупной площади категорией из всей классификации. Поэтому подход к моделированию должен быть наиболее продуманным и учитывающим многофакторность ситуаций с объектами этой категории. Предполагается создавать TIN-модели на уровне детализации LOD3-LOD4 под формат CityGML для выгрузки на общегородскую картографическую подложку и корректного учета / отображения кадастровых данных [14].

Четвертая категория объектов недвижимости на урбанизированных территориях подразумевает временное включение различных объектов, таких как незастроенные земельные участки и любые другие объекты, не подпадающие под критерии других категорий с целью исключения их из очереди на создание трехмерных моделей для отображения в 3D-кадастре, следовательно, они должны быть отображены в виде 2D-полигона на общей картографической подложке. Предлагается также внести в четвертую категорию объекты обороны и любые конфиденциальные земельные ресурсы, находящиеся в границах населенных пунктов. Автором предлагается создать правовую рамку, подразумевающую возможность пересмотра категории для ОН по инициативе органов учета и регистрации ОН, а также собственников и / или арендаторов.

Выполненный анализ международного подхода к моделированию объектов для целей 3D-кадастра в работах [40, 86, 8] лег в основу предложенной классификации объектов недвижимости.

Любые вводимые классификации ОН должны сопровождаться соответствующими многокритериальными требованиями к моделям самих объектов, включаемых в 3D-кадастр и отвечающих задачам 3D LAS. Анализируя порядок осуществления ГКУ ОН и особенности кадастровой системы РФ, заметим, что на данный момент существуют определенные технические, юридические и концептуальные препятствия, мешающие прямой имплементации международного опыта создания и ведения трехмерных реестров прав собственности и недвижимого имущества. Однако уже сейчас можно говорить о сформированном ряде национальных отли-

чий, связанных с климатическими, инфраструктурными и региональными условиями субъектов РФ, а также наборе национальных программ социально-экономического развития, которые необходимо учитывать при разработке дорожной карты перехода к новой системе [56, 10, 18, 47, 57, 70, 85].

В настоящее время в России сделаны только самые первые шаги в сторону создания 3D-кадастра. Политическое намерение было выражено в трех основных постулатах, закрепляемых распоряжением Правительства РФ от 01.12.2012 № 2236-р [56]: определение 3D-модели объекта недвижимости и требования к методам создания и внутреннему содержанию 3D-моделей [59].

Изучая приведенные источники и нормативные акты, можно заключить, что на данном этапе подготовки перехода к 3D-кадастру в России выполнена лишь малая часть эссенциально значимых условий трансформации, а именно:

1) дано определение 3D-модели как электронного документа в форматах .dxf, .rvt, .pln, .skp, содержащего пространственное описание конструктивных элементов здания, строения, объекта незавершенного строительства;

2) приведены начальные требования к таким документам – масштаб выполнения моделей должен быть 1 : 1, а также содержать координатную привязку к ГГС или ОМС;

3) в части содержания 3D-моделей указаны только обязательные сведения о глубине и высоте всех конструктивных элементов.

Анализируя опыт Российско-Нидерландского проекта по 3D-кадастру и международную практику, а также предложения российских коллег, можно сделать следующие рекомендации.

1 Необходимо создать ряд «идеальных» 3D-моделей типовых объектов как ориентир для создания стандарта моделирования и описания ОН.

2 Следует регламентировать пространственную точность местоположения конструктивных элементов и всего комплекса кадастровых работ по моделированию.

3 Необходимо организовать беспрепятственный доступ к отказоустойчивой базе данных будущего 3D-кадастра.

4 Надо устранить противоречия между функциями учета и эффективного управления городскими пространствами путем глубокой нормативно-правовой и технологической проработки вопросов актуального и достоверного моделирования подземных коммуникаций и надземных перекрывающихся контуров.

5 Следует разработать научно-техническое и практическое обоснование к сбору трехмерных пространственных данных на всей территории страны для целей учета и эффективного управления городскими пространствами и другими земельными ресурсами.

Представленные выводы-рекомендации должны лечь в основу будущих требований к методам и технологиям создания цифровых трехмерных моделей объектов недвижимости с учетом социоэкономических и технологических условий каждого региона страны.

Однако, для текущего состояния сферы учета и регистрации прав на ОН в Российской Федерации проблема выбора технологии сбора данных и методики формирования 3D-моделей объектов недвижимости особенно актуальна. Этот вывод подтверждается приведенными выше рассуждениями и следующими заключениями:

1) анализ стратегических документов в области кадастра [53, 56, 55] выявил растущую склонность к имплементации многомерного подхода для моделирования объектов недвижимости, а также учет и регистрацию таких моделей в Едином государственном реестре недвижимости;

2) существующая законодательная возможность внесения в ЕГРН 3D-моделей зданий, сооружений, помещений и объектов незавершенного строительства при подготовке технических планов кадастровыми инженерами [59] остается трудно реализуемой из-за недостаточности научно-методического обоснования для проведения соответствующих кадастровых работ в Российской Федерации [40].

Таким образом, следует разработать геодезическую методику сбора трехмерных пространственных данных для целей трехмерного кадастра объектов недвижимости с перспективой развертывания трехмерных систем управления земельными

ресурсами на урбанизированных территориях. При этом подобная разработка должна учитывать опыт отечественных ученых и практиков, а также опираться на международные стандарты, которые уже сейчас задают направление развития сферы в РФ. Создание технологической схемы выполнения таких кадастровых работ в части геодезического обеспечения должно учитывать предложенную классификацию ОН и скорую интеграцию строительных стандартов BIM и IFC, при этом не препятствовать свободному доступу к данным моделирования широкого круга агентов. Подразумевается высокая интероперабельность и возможность интеграции открытых форматов CityGML.

Подобная технология выполнения кадастровых работ должна быть ориентирована на обеспечение базы данных 3D-кадастра цифровыми моделями ОН, относящимися ко **второй** и **третьей** категориям.

Дополнительно стоит рассмотреть глобальный вектор развития цифровизации государственных услуг в Российской Федерации для понимания места будущего 3D-кадастра.

2.3 Анализ вектора развития в сфере управления земельными ресурсами на урбанизированных территориях в Российской Федерации

Трехмерные цифровые кадастровые системы предназначены для обеспечения полностью интегрированного трехмерного отображения юридических границ и прав, ограничений и обязанностей (RRR) в многоэтажных домах и сложных имущественных комплексах, которые согласуются с физической реальностью. Наше когнитивное понимание юридических границ и информации RRR становится более глубоким, когда мы связываем это с нашим визуальным восприятием реального мира [161].

Однако важно учитывать, что задача трансформации существующей системы кадастрового учета ОН и прав на них является очень наукоемкой и затратной. На данный момент, как было показано выше, большинство исследований в области трехмерных кадастровых систем проводится на уровне концептуализации и пилот-

ных проектов. Реальной полностью трехмерной кадастровой системы еще нет ни в одной стране мира.

Главная ценность этого исследования заключается в том, что многомерный характер BIM и CityGML дает возможность расширить 2D-представление с помощью концепций, определенных в модели создания трехмерного цифрового кадастра управления земельными ресурсами (LADM). Но для того, чтобы говорить об этом этапе, необходимо объективно оценивать текущее состояние и вектор развития области в нашей стране. Таким образом, в этом пункте рассмотрим и проанализируем самые значимые и актуальные законопроекты, инициативы и принятые практики в области BIM и трехмерной кадастровой деятельности в Российской Федерации.

Задача по развитию электронных сервисов кадастра в Российской Федерации была поставлена перед созданным на базе Росреестра новым подразделением «Лаборатория будущего», открытие которого состоялось 19 января 2018 г. Это подразделение планирует разработку и запуск новых проектов. Лабораторией разработаны и реализуются три проекта: Фабрика электронных регистраций, «3D-кадастр» и электронный сервис «Жизненные ситуации» [69].

Проект «3D-кадастр» был запущен в марте 2018 г. в пилотном режиме на базе жилого квартала в центре Москвы. В трехмерном кадастре будут отображены модели рельефа местности, трёхмерные модели зданий с фотографическими текстурами, трёхмерные модели крупных инженерно-технических сооружений и коммуникаций.

Исходя из вышесказанного, становится ясно, что транзит системы Единого государственного реестра недвижимости к трехмерному виду в России уже подготавливается. Трёхмерные модели объектов недвижимости являются основными элементами баз данных для проектов Росреестра в этой области.

Приказом Минстроя России № 866/пр от 25.12.2020 была утверждена «Концепция проекта цифровизации городского хозяйства “Умный город”», что является логическим продолжением программы «Информационный город», действовавшей до 2018 г., и находится в рамках национального проекта «Жилье и городская среда» и национальной программы «Цифровая экономика».

Приказ [54] предполагает разработку концепции «Умного города» в следующих целях:

- сформулировать основные принципы и цели проектов внедрения технологий умных городов с учетом существующих вызовов;
- унифицировать в Проекте основные используемые понятия, термины и определения для создания единого языка описания;
- описать архитектуру умных городов Проекта – базовую организацию элементов умного города, воплощенную в ее компонентах, их отношениях между собой и окружением;
- выявить и описать ключевые направления развития умных городов;
- определить и описать основные подходы и механизмы, обеспечивающие устойчивое городское развитие.

Важно подчеркнуть, что данный приказ призван конкретизировать и расширить набор терминов и практик, уже существующих и применяющихся. Однако, вместе с этим в концепцию закладываются пункты современной повестки международного уровня, касающиеся стремительно растущего политико-экономического статуса больших городов. Появление городов на мировой геополитической арене чаще всего связано с конкретными темами. Фокус концепции обращен на следующие направления деятельности и принципы:

- ориентация на человека;
- акцент на экономическую эффективность;
- доступность и удобство сервисов и услуг.

Подобный обобщенный набор «ценностей» концепции, закладываемый приказом, также подкрепляется международным опытом, что уже было рассмотрено в других работах авторов [225, 68].

Рассматривая описанные решения, отметим, что они подразумевают обращение к новейшим технологиям по типу BigData и другим, что по сути требует значительной технической модернизации. Агрегирование, обработка и хранение огромных массивов данных со множества разнообразных городских датчиков по-

требует значительных мощностей и пока не ясно, как это будет реализовано. Сложно предсказать, сколько времени и ресурсов потребуется на полномасштабное развертывание подобной системы и тем более на ее отладку для безошибочного функционирования и качественного нейросетевого прогнозирования.

Сравнивая аналогичный технологический скачок, направленный на объединение двух баз данных (ЕГРП и ГКН), в соответствии с принятием 13.07.2015 ФЗ № 218-ФЗ «О государственной регистрации недвижимости», на который потребовалось не менее 5 лет, можем констатировать, что до сих пор кадастровая деятельность может испытывать серьезные сложности из-за временных сбоев и технических неполадок в работе системы ЕГРН (URL: <https://erzrf.ru/news/iz-za-sbojev-v-rabote-rosreestra-ne-registriruyutsya-ddu>; URL: <https://prime.ru/news/rosreestr-soob-schaet-ob-ustranении-zaderzhek-v-obrabotke-zaprosov-na-predostavlenie-svedeniy-soderzhaschikhsya-v-egrn-na-ofitsialnom-sayte>; URL: <https://www.rbc.ru/economics/13/04/2021/6073fa4d9a7947f511e22e28>).

В первом разделе был подробно рассмотрен пилотный проект 3D-кадастра в РФ, в котором принимают участие Росреестр, Федеральный кадастровый центр «Земля», Агентство кадастра, регистрации земель и картографии Нидерландов и Технический университет города Делфт. Пока результаты этой разработки не внедрены в производство. Однако в концепции заявлено, что цифровое городское управление будет осуществляться через построение «цифровых двойников» городов. Что, как мы видим из международной практики, невозможно без создания стабильной системы 3D-кадастра в стране.

К тому же в 2018 г. Минстрой представлял свои разработки, освещающие вопросы использования существующих российских информационных систем для принятия оптимальных градостроительных решений, в которых пришел к заключению о невозможности использования существующей информационной инфраструктуры ввиду неструктурированности данных. Детально проработанные предложения вошли в утвержденные «Методические рекомендации по внедрению цифровых решений в систему градостроительного проектирования на основе подхода «Умный город».

Федеральным законом от 27.06.2019 № 151-ФЗ (ред. от 13.07.2020) «О внесении изменений в Федеральный закон "Об участии в долевом строительстве многоквартирных домов и иных объектов недвижимости и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации" и отдельные законодательные акты Российской Федерации» в Градостроительный кодекс РФ было внесено множество изменений с целью создать к концу 2022 г. общероссийскую инфраструктуру (ГИСОГД РФ) для интеграции разрозненных информационных систем субъектов РФ, федеральных ГИС и частных информационных систем юридических лиц. Наиболее важное введенное понятие – понятие об информационной модели объекта капитального строительства (ИМ) (Кадастр.Москва. URL: <https://кадастр.москва/news/582>).

Также должны быть подготовлены все технологические решения, требования и регламенты по применению информационных моделей зданий и сооружений на всех этапах жизненного цикла, что звучит вполне логично и согласовывается с международной практикой.

Таким образом, с 2022 г. станет обязательным использование ИМ в случае государственного финансирования строительства, о чем сообщается в подписанном постановлении Правительства России от 05.03.2021 № 331.

На этапе обсуждения предполагалось, что формирование информационной модели будет обязательным только для объектов стоимостью выше 500 миллионов рублей. В утвержденном варианте постановления ограничение убрали. Единственное существующее исключение — это объекты обороны и безопасности.

К данному моменту разработаны и внесены в Градостроительный кодекс следующие правки и обновления в связи с данным постановлением:

- 1) требования к порядку включения информационных моделей в ГИСОГД (приказ Минстроя от 06.08.2020 № 433/пр);
- 2) классификатор строительной информации (приказ Правительства РФ от 12.09.2020 № 1416, приказ Минстроя РФ от 06.08.2020 № 430/пр, <http://ksi.faufcc.ru/>); правила формирования и ведения классификатора строительной информации (приказ Правительства РФ от 12.09.2020 № 1416);

3) правила формирования и ведения информационной модели, состава сведений, документов и материалов, подлежащих включению в информационную модель (приказ Правительства РФ от 15.09.2020 № 1431);

4) перечень случаев, при которых формирование и ведение информационной модели являются обязательными (приказ Правительства РФ от 05.03.2021 № 331).

На официальном портале правовой информации в разделе 3.4 основных направлений деятельности Правительства РФ до 2024 г., утвержденных 29.09.2018, определено, что развитие строительной отрасли будет обеспечено за счет установления ограничений на использование устаревших и стимулирования внедрения передовых технологий в проектировании и строительстве, в том числе перехода к системе управления жизненным циклом объекта капитального строительства путем внедрения технологии информационного моделирования. Очевидно, что вместе с модернизацией правовой рамки отрасли понадобятся и новые специалисты с актуальными знаниями о современных технологиях.

Директор Института развития строительной отрасли и руководитель портала ЕРЗ.РФ Кирилл Холопик отмечал, что проведенный среди более 1 200 проектных организаций опрос показал крайне низкий уровень кадровой готовности к внедрению новых технологий. Так всего 20 % проектировщиков прошли обучение BIM-технологиям, и только половина из них имеет реальный опыт работы с такими задачами. Получается, лишь 10 % проектировщиков имеют хотя бы один заказ, связанный с BIM.

Поэтому стоит упомянуть, что приказом Минтруда России от 16.11.2020 № 787н «Об утверждении профессионального стандарта “Специалист в сфере информационного моделирования в строительстве”» утвержден профессиональный стандарт специалиста по информационному моделированию в строительстве.

Утвержденный профессиональный стандарт «Специалист в сфере информационного моделирования в строительстве» установил требования к квалификации и описал трудовые функции специалистов – пять обобщенных трудовых функций:

1) техническое сопровождение информационного моделирования объектов капитального строительства;

- 2) разработка и использование структурных элементов информационной модели ОКС на этапе его жизненного цикла;
- 3) организация разработки и использования структурных элементов информационной модели ОКС на этапе его жизненного цикла;
- 4) управление процессами информационного моделирования ОКС на этапе его жизненного цикла;
- 5) управление деятельностью по внедрению, поддержке и развитию технологий информационного моделирования ОКС на уровне организации.

Далее стоит обратить внимание на принятый закон № 494-ФЗ «О внесении изменений в Градостроительный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в целях обеспечения комплексного развития территорий». Он был принят Госдумой 23.12.2020, одобрен Советом Федерации 25.12.2020 и подписан Президентом РФ 30.12.2020.

Подписанный Президентом РФ закон направлен на совершенствование института комплексного развития территорий (КРТ), а также механизмов расселения аварийного жилья и жилья, подлежащего сносу или реконструкции. Вступивший в силу законодательный акт упрощает процедуру выделения застройщикам не только свободных, но и уже застроенных, но неэффективно используемых земель, делая феномен редевелоппмента гораздо более привлекательным для застройщиков.

Согласно ФЗ [51] градостроительная деятельность может осуществляться в том числе в виде КРТ, под которым понимается совокупность мероприятий, выполняемых в соответствии с утвержденной документацией по планировке территории и направленных на создание благоприятных условий проживания граждан, обновление среды жизнедеятельности и территорий общего пользования поселений, городских округов.

Анализируя данный закон, можно сразу заметить, что его ангажированность лежит в области расширения влияния и объемов производства стройкомплекса. Но, опуская политические мотивы, выведем на первый план формулируемые этим законом предпосылки к развитию городских территорий в формате глобального

подхода. По своей сути комплексное развитие любой территории невозможно без сплошного межевания и моделирования этой территории, поскольку любое проектирование в современных условиях будет выполняться с учетом всей сложной взаимосвязанной инфраструктуры и задействованных групп интересов – иначе экономической эффективности не добиться. Фактически, если этот закон будет исполняться так, как предполагается, должна быть симметричная реакция органов власти в области информационного обеспечения геодезическими данными таких проектировочных и строительных работ. Вместе с этим должен быть сформирован и запрос на ускорение внедрения 3D-кадастра и подготовку специалистов, способных применять эти технологии на реальном производстве.

В данном контексте важнее рассмотреть СП 333.1325800.2020, в котором в пункте 3.1.14 дается определение понятия «уровень проработки модели»: набор требований, определяющий полноту проработки элемента цифровой информационной модели. Уровень проработки задает минимальный объем геометрических, пространственных, количественных, а также любых атрибутивных данных, необходимых для решения задач информационного моделирования на конкретной стадии жизненного цикла объекта [73].

В таблице 5.1 указанного СП содержится подробная классификация уровней проработки, имеющая отношение исключительно к строительной спецификации и отвечающая только требованиям этой области. Автором выдвигается предложение включить в эту классификацию кадастровый уровень проработки данных под литерами «К1» и «К2», которые, в свою очередь, будут соответствовать LOD3 и LOD4 в терминологии LADM и CityGML. Таким образом, можно обеспечить перевод информации и плавное сочленение градостроительных, строительных и кадастровых моделей.

Столь комплексная задача требует крайней внимательности и щепетильности в совместной работе множества органов власти и других задействованных агентов при реализации через современные цифровые технологии.

Здесь необходимо обратить внимание на развитие концепции Государственной единой облачной платформы (ГЕОП) с 2013 г., ключевой идеей которой явля-

ется перевод государственных и муниципальных информационных ресурсов на сервисную модель с применением облачных технологий. В её рамках предусматривается оказывать услуги по предоставлению облачных вычислений, то есть по дистанционной обработке ведомственных данных. Для уменьшения риска «тотального отказа» предполагается создание распределенной, но при этом скоординированной с точки зрения мониторинга и управления инфраструктуры центров обработки данных (Кадастр.Москва. URL: <https://кадастр.москва/news/603>).

В 2013 г. по заказу Минкомсвязи системный интегратор «КРОК» разработал концепцию и технический проект по реализации единой инженерной инфраструктуры для государственных органов (проект «Гособлако») с учетом требований регуляторов к обеспечению безопасности. По итоговой оценке, анализ Минкомсвязи экономической целесообразности проекта исходя из информации по ИТ-бюджетам всех федеральных органов государственной власти показал, что переход на единую инфраструктуру позволил бы оптимизировать затраты на информатизацию федеральных госорганов (ФОГВ) более чем на 22 %.

Периодизация развития концепции представлена ниже:

✓ 2021 г.

- К работе над Гособлаком привлекли SberCloud, «Лабораторию Касперского» и мобильных операторов.

- Минцифры создало межведомственную рабочую группу для развития Гособлака.

- Эксперимент с «Гособлаком» продлен еще на два года.

- Результаты эксперимента с миграцией ведомств в «Гособлако» в 2019–2020 гг.

- Развитие нормативной базы, эффективная утилизация ресурсов ГЕОП, новая модель тарификации ГЕОП.

✓ 2020 г.

- Участие Минэкономразвития, Минстроя и Минздрава в проекте Гособлака.

- Представлены планы развития ГЕОП 2021–2022 гг.

- Итоги миграции ведомств в ГЕОП.
- Минкомсвязи продлевает на два года эксперимент по переводу ИТ-систем госорганов в облако.

✓ 2019 г.

- Mail.ru Group получила контракт на разработку государственного «облака».
- Правительство распорядилось: внедрять «Гособлако» будут единственные исполнители – «Ростелеком» и НИИ «Восход».

- Правительство утвердило концепцию создания государственной единой облачной платформы.

- Власти утвердили эксперимент по переходу госинформсистем в «Гособлако».

- Новая концепция.

✓ 2017 г.: "Гособлако" должно быть запущено в промышленную эксплуатацию до конца 2019 г.

✓ 2016 г.:

- Законопроект о Гособлаке.
- Поручение Президента РФ о единой инфраструктуре.
- Оценки перспектив «Гособлака» участниками ИТ-рынка перед стартом проекта.

- Первым клиентом «Гособлака» может стать Минкомсвязи.

✓ 2015 г.: Утверждение концепции «Гособлака».

Параллельно с Гособлаком развивается концепция «ГосТех» – единая цифровая платформа РФ, представляющая собой «экосистему создания, развития и эксплуатации государственных информационных систем» (Кадастр.Москва. URL: <https://кадастр.москва/news/502>).

Помимо этого, существует Национальная система управления данными (НСУД), предназначенная для стандартизации требований к организации данных в системах. Концепция НСУД не предполагает переноса данных из существующих разрозненных информационных систем. Вместо этого будут создаваться так назы-

ваемые «витрины данных», например, «Цифровой профиль», в котором будут храниться сведения о гражданах из различных баз данных (ФНС, Росреестр, МВД, ПФР и др.). По сути это следующий этап эволюционного развития государственных сервисов, еще одна попытка унификации требований к организации данных в разрозненных информационных системах, которые развивают разные ведомства (Кадастр.Москва. URL: <https://кадастр.москва/news/553>).

Одно из самых важных нововведений в области кадастровой деятельности – это Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 № 2429 «О проведении в 2021 году эксперимента по созданию Единого информационного ресурса о земле и недвижимости» (ФГИС ЕИР) на территории регионов – Республики Татарстан, Краснодарского края, Пермского края и Иркутской области.

Согласно постановлению заявлены цели в области сбора и сопоставления сведений из различных государственных информационных ресурсов, разработки правовых, методологических и технологических основ для объединения сведений, а также создания инструментов пространственного анализа и запросов. Ключевыми исполнителями назначены Росреестр и Министерство цифрового развития.

Эталонными данными для создания ЕИР являются, согласно постановлению, сведения:

- Единой электронной картографической основы (ЕЭКО);
- Федерального фонда пространственных данных (ФФПД);
- Единого государственного реестра недвижимости;
- Фонда данных государственной кадастровой оценки (ФД ГКО);
- Федерального фонда данных дистанционного зондирования Земли из космоса;
- Государственного адресного реестра.

В качестве дополнительных источников информации должны быть использованы сведения:

- Федеральной государственной информационной системы территориального планирования;

- Государственного кадастра особо охраняемых природных территорий;
- Единой федеральной информационной системы о землях сельскохозяйственного назначения и землях, используемых или предоставленных для ведения сельского хозяйства в составе земель иных категорий;
- Единого государственного реестра объектов культурного наследия;
- Реестра федерального имущества;
- Государственного лесного реестра;
- ФГИС Автоматизированной системы лицензирования недропользования;
- Государственного водного реестра;
- Информационной системы обеспечения градостроительной деятельности субъектов Российской Федерации;
- Информационных систем органов исполнительной власти.

Эксперимент проводится в рамках национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации».

Обобщая аналитическое исследование этой части работы, заметим, что на данный момент в Российской Федерации развернута обширнейшая работа по модернизации правовой рамки в области цифровизации государственных сервисов и наиболее рентабельных производственных областей (строительство, добыча природных ресурсов, управление недвижимостью). Сейчас в стране организованы, кроме рассмотренных выше, следующие информационные системы-платформы.

- 1 Система межведомственного электронного взаимодействия (СМЭВ).
- 2 Единая система нормативно-справочной информации (ФГИС ЕСНСИ).
- 3 Федеральная государственная информационная система «Федеральный реестр государственных и муниципальных услуг (функций)» (ФГИС ФРГУ).
- 4 Единая система идентификации и аутентификации (ЕСИА).
- 5 Единая биометрическая система (ЕБС).
- 6 Единый портал государственных и муниципальных услуг (ФГИС ЕПГУ).
- 7 Государственная информационная система о государственных и муниципальных платежах (ГИС ГМП).

Непосредственно в области управления земельными ресурсами на урбанизированных территориях к 2023 г. ожидается развертывание как минимум двух сосуществующих информационных систем: ГИСОГД РФ для градостроительной области и ФГИС ЕИР для кадастровой. Отдельно стоит отметить разработку комплекса стандартов «Единая система информационного моделирования» для строительства. Вопрос согласованности и интероперабельности данных, а также оперативности взаимодействия между ними станет наиболее значимым на первых этапах работы систем.

Утвержденный 12.11.2021 План мероприятий (дорожная карта) № 12012п-П49 по внедрению технологий информационного моделирования в строительной отрасли включает в себя множество пунктов, посвященных в основном строительной отрасли и обязательному внедрению информационного моделирования ОКС при использовании бюджетных средств на само строительство. С ориентиром на 2024 г. в дорожной карте и согласно Постановлению Правительства РФ от 05.03.2021 № 331 планируется разработка XML-схем для взаимодействия с информационными моделями, а также доработка функционала системы Росреестра, используемых для кадастрового учета, землеустройства, мониторинга, с целью обеспечения формирования и ведения информационных моделей (Кадастр.Москва. URL: <https://кадастр.москва/news/738>).

Выводы по второму разделу

Проведенное всестороннее и подробное исследование с поэтапным анализом международной практики моделирования урбанизированных территорий и аналитический обзор состояния области управления земельными ресурсами в Российской Федерации показало, что в развитии кадастровой системы по сравнению с западноевропейскими странами наша страна отстает. Стохастическое развитие градостроительной области и аппетит стройкомплекса в крупных городах заставляет на ходу придумывать приемлемые для России модели систем кадастрового учета сложных трехмерных объектов недвижимости и их взаимоотношений.

Очевидным кажется вывод, что развертывание сегмента 3D-кадастра целесообразно как минимум для высокоурбанизированных территорий крупных городов-миллионников, поскольку развитая инженерная инфраструктура, наличие опыта ведения традиционного кадастра недвижимости и возможность кадровой мобилизации способствуют такой инновации.

Рассмотренные во втором разделе этой работы инициативы в областях управления территориями и недвижимостью в России, а также цифровизации и «умного города» приобретают с каждым годом всё большую актуальность. Совершенствование законодательства в части строительных сводов правил, разработки классификации ОН под задачи трехмерного кадастра и внедрение новых технологий способствуют получению более четкой, объективной, достоверной, наглядной кадастровой информации относительно объектов недвижимости, которая в свою очередь будет иметь экономический, экологический и социальный эффекты.

Логичным направлением развития в отечественном поле видится дальнейшее осмысление международного опыта и обобщение накопленных собственных знаний для выработки нормативных рекомендаций и технико-методических требований к информационному обеспечению будущих трехмерных систем на основе уже известных стандартов из мировой практики. Отсутствие подобных финализированных и универсальных рекомендаций оставляет открытым вопрос геодезического обеспечения моделирования городских пространств для задач 3D-кадастра и «умного города». Таким образом, сформулируем техническую задачу этого исследования.

Учитывая высказанные во втором разделе диссертационного исследования предложения по классификации ОН в целях трехмерного моделирования и доработки существующих строительных СНиПов кадастровым уровнем детализации, необходимо провести исследования современных геодезических технологий и методов сбора пространственной информации с целью получения данных (трехмерных моделей урбанизированных территорий), пригодных для представления в принятых в международной практике форматах (IFC и CityGML) и платформах. Учи-

ывая, что уже сейчас есть различные методики конвертации данных между форматами, стоит сконцентрировать усилия на разработке методики сбора трехмерных пространственных данных под наиболее распространенные уровни детализации моделей (LoD 3) – внешняя подробная модель, которая соответствует предлагаемому уровню проработки К1 и относится к 2-му и 3-му категориям объектов. Такой подход должен базироваться на втором типе моделирования – геометрическом, поскольку подходит под оба стандарта представления данных и IFC, и CityGML3.0, к тому же данный тип моделирования поддерживается программами открытого кода, а значит, сделает методику менее затратной и более адаптивной. Таким образом, следует выбирать программный продукт, ориентированный на работу с массивами (облаками) точек и поддерживающий использование системы координат с заданными параметрами и возможностью представления сформированной 3D-модели в формате (.dxf, .rvt, .pln, .skp) либо облегченного экспорта модели в программу, позволяющую представлять данные в таком формате [59].

К отдельным выводам по разделу стоит отнести следующие.

1 В международной практике твердо закрепились рассмотренные в разделе технологии пространственного моделирования отдельных зданий (IFC) и урбанизированных территорий (CityGML).

2 Концепция LADM, принятая в РФ, является основой создания 3D-кадастра, который, в свою очередь, рассматривается как ядро «умного города», и 3D-системы управления земельными ресурсами города (3D LAS).

3 Международное сообщество ученых и специалистов демонстрирует пристальное внимание к вопросам технической организации баз данных и их объединения.

4 На основе анализа международного опыта разработана классификация ОН с учетом потребностей будущего 3D-кадастра и 3D LAS, а также представлены требования к таким моделям.

5 Сравнительный анализ, проведенный в работе, показал, что вопросы сбора геопропространственной информации рассматриваются поверхностно. Выделены

только форматы и структуры самих данных, подходящих под принятые методы моделирования. Технологиям съемки не уделено внимания.

6 Принятие на государственном уровне международных стандартов (BIM, IFC, LADM) и попытка адаптации мирового опыта позволяет предсказывать и направлять развитие области, что, безусловно, положительно отразится на всех сферах производства.

7 Предложены нововведения в существующие своды правил строительной области, учитывающие потребности 3D-кадастра и благоприятно влияющие на процесс интеграции баз данных. В части уровней проработки информационных моделей для задач 3D-кадастра предложено дополнить СП новыми уровнями K1 и K2, соответствующими уровням детализации в терминологии CityGML LoD3 и LoD4.

8 В отечественной практике внедрение международного опыта идет медленными, но уверенными шагами. Мы находимся на этапе модернизации правовой рамки, адаптации стандартов ISO и проведения первых пилотных проектов, главной целью которых скорее является знакомство с возможностями технологии и накопление опыта у всех заинтересованных агентов.

9 Разработка и принятие образовательных стандартов в области пространственного моделирования зданий является ярким примером осознания неготовности текущего кадрового состава к полному переходу на новые технологии и стратегического мышления на благо государства.

10 Обширное развитие цифровых государственных систем и баз данных служит признаком скорого полномасштабного перехода к реализации концепции «умного города».

11 В свою очередь, область кадастрового учета ОН и регистрации прав создает свою ФГИС с упором на открытые стандарты CityGML, что опять же скажется позитивно на развитии области в целом, поскольку международный опыт богат и доступен.

12 Использование в градостроительной и кадастровой системах международных стандартов должно положительно сказаться на будущем слиянии и унификации.

13 Геодезическому обеспечению всех вышеперечисленных процессов не уделено должного внимания. Только комитет НОПРИЗ по инженерным изысканиям выразил намерение возобновить разработку стандартов на процессы выполнения работ по инженерным изысканиям в сфере геодезии.

14 Стоит ожидать постепенной имплементации строительных стандартов информационного моделирования международного уровня (IFC, BIM) в область кадастровых работ для целей учета и регистрации ОН ориентировочно к 2024 г.

3. МЕТОДИКИ И ТЕХНОЛОГИИ СБОРА ТРЕХМЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ 3D-КАДАСТРА И 3DLAS

3.1 Сравнительный анализ существующих геодезических подходов к сбору трехмерной информации

Для решения поставленной в предыдущем разделе технической задачи по разработке методики информационного обеспечения систем 3D-кадастра необходимо подобрать из существующих и доступных на данный момент такие геодезические технологии, которые позволят эффективно осуществлять сбор пространственной информации для моделирования и представления кадастровых данных, а также смогут удовлетворять дальнейшие требования при становлении системы. Эти вопросы рассматриваются в статьях [117, 191, 203]. Учитывая комплексность задачи по созданию трехмерной системы кадастра и совокупности всех взаимодействующих и параллельно развертываемых уже сейчас в РФ электронных баз данных и сервисов, можно сделать вывод, что внедрение будет происходить поэтапно и потребуются несколько промежуточных решений.

Основываясь на выводах второго раздела диссертационного исследования, с уверенностью можно сказать, что стандарты моделирования IFC в BIM для отдельных инфраструктурно сложных и высокотехнологичных земельно-имущественных комплексов будут внедрены повсеместно, а информационные модели зданий в итоге войдут в ЕГРН с кадастровым уровнем проработки. Также учитывая, что наиболее вероятным методом моделирования объектов, отнесенных ко 2-й и 3-й категории, будет принят CityGML – для больших, ненагруженных инфраструктурой и представляющих меньшую ценность территорий и ОН, имеет смысл обратить внимание на доступные геодезические технологии, которые могут быть использованы для сбора данных при моделировании объектов, относимых автором к этим категориям (2 и 3) моделируемых объектов недвижимости. По сути, задача сводится к выбору и обоснованию геодезических методов создания реалистичных измерительных 3D-моделей городской среды для задач 3D-кадастра и 3DLAS.

Под измерительной реалистичной 3D-моделью понимается 3D-модель объекта, построенная с заданной геометрической точностью в метрической системе координат с привязкой к пунктам государственной геодезической сети (ГГС) или опорной межевой сети (ОМС) и имеющая реальную фотографическую текстуру, также позволяющая измерять координаты в любой точке этой модели [16].

Технологии создания реалистичных измерительных 3D-моделей можно разделить по методу сбора данных для их формирования на геодезические, картографические, стереофотограмметрические. Технологии наземной и воздушной лазерной съемки рассмотрим подробнее.

Отметим, что для создания реалистичности 3D-модели необходимо использовать реальные фотографические текстуры, трансформированные на соответствующую поверхность 3D-модели [68].

В качестве исходных материалов для построения таких моделей могут использоваться различные данные:

- материалы лазерного сканирования (наземного, мобильного, воздушного);
- материалы наземной стереофотосъемки;
- материалы аэрокосмической съемки;
- топографические планы;
- материалы фасадной тахеометрической съемки.

Геодезическая технология создания трехмерной модели объекта недвижимости по сути является фасадной съемкой, выполняемой тахеометром в соответствии с техническим заданием и требуемой точностью-детальностью итоговой модели. Сильной стороной этого метода является его высокая точность и относительная простота исполнения при наличии подходящего оборудования. Основными минусами этой технологии являются колоссальные временные затраты на производство как полевых, так и камеральных работ, низкая информативность по сравнению с другими технологиями (отсутствие одновременной фотофиксации и т. д.), невозможность получения цельной модели только этим способом (крыши и т. д.).

Изучение и сравнение картографических методов создания трехмерных моделей представляется отдельным научным направлением, которому посвящено немало статей [38, 36, 37, 35, 39, 216, 48]. Общей чертой этого метода всегда будет зависимость от исходных данных и ограниченность доступного в ГИС-программах инструментария для моделирования. Большинство этих подходов создает трехмерные измерительные сцены на большие площади и скорее решает задачи обзорного характера и макропланирования.

Стереофотограмметрические методы являются обширным направлением и одним из первых методов создания реалистичных 3D-моделей. С развитием систем цифровой фотограмметрии и технологий аэрофотосъемки с использованием БПЛА этот метод приобретает все большую актуальность, поскольку позволяет создавать высокоточные реалистичные цифровые модели местности, в том числе и трехмерные модели ОН. Большим плюсом данного подхода является его оперативность, относительная дешевизна, большая степень автоматизации процессов полевых работ и камеральной обработки результатов. Сильным минусом в этом случае является жесткая зависимость от обстоятельств и условий съемки: время года, погода, освещенность, конструктивное устройство территории или объектов съемки (наличие перекрывающихся областей, слепых зон, обильной растительности), необходимость совмещения перспективной и надирной съемки для получения полной модели объекта. А при использовании наземных методов фотограмметрии возникает сложность с получением данных по поверхностям крыш и им подобным, что также является минусом метода.

Наиболее современные методы сбора информации для построения трехмерных моделей используют технологию LIDAR (Light Detection and Ranging – обнаружение и определение дальности с помощью света) – технологию получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления поглощения и рассеяния света в оптически прозрачных средах, то есть активный дальномер оптического диапазона, который как правило, сопровождается и фотографической съемкой.

Основным назначением наземного лазерного сканирования (НЛС) является получение трехмерных моделей исследуемых объектов. Наземное лазерное сканирование на сегодняшний день является наиболее эффективным в случаях, когда необходимо обеспечить высокую детальность моделей при оперативном выполнении съемочных работ. Большое разнообразие характеристик НЛС и ПО позволяет говорить о возможности практического применения данной технологии во многих областях человеческой деятельности, в которых необходимо знать геометрические характеристики объектов [22].

Основными преимуществами данной технологии являются:

- дистанционность;
- высокая скорость выполнения измерений;
- информативность получаемой модели;
- автоматизация процесса выполнения измерений;
- непрерывность получаемой модели [22].

В отличие от традиционных дискретных измерений, наземное лазерное сканирование позволяет получать точечные модели высокой плотности, т. е. результатом измерений является практически непрерывная модель объекта. Это дает возможность выполнять постоянный самоконтроль при обработке данных, в отличие от традиционных методик, когда после выполнения измерений нельзя достоверно проконтролировать, с какой ошибкой был измерен тот или иной параметр [22].

Приведенные преимущества метода наземного лазерного сканирования применительно к геодезии позволяют говорить о высокой эффективности его для изучения геометрических параметров объектов сложной формы, объектов, содержащих большое количество отдельных элементов, или протяженных объектов. Наземное лазерное сканирование может применяться для решения следующих задач.

1 Исполнительные трехмерные съемки для проектирования и реконструкции различных объектов.

2 Мониторинг инженерных сооружений и природных объектов.

3 Создание цифровых моделей рельефа, определение объемов складов, карьеров, разрезов.

4 Создание цифровых топографических планов крупных масштабов на территории с высокой плотностью застройки и промышленные объекты.

5 Документирование геометрических характеристик уникальных архитектурных объектов, памятников старины и археологических объектов.

6 Геометрический контроль строительства зданий и сооружений, проектирования и монтажа фасадных конструкций.

7 Обеспечение безопасности жизнедеятельности [22].

Безусловным плюсом технологии является возможность выполнения съемки объектов с гораздо большей плотностью и скоростью, высокая степень автоматизации полевого процесса и относительная простота исполнения, не требующая специфических условий съемки. Исключение слепых зон и высокая информативность за счет плотности сканирования и одновременной фотофиксации значительно повышают потенциал использования собираемого полевого материала. Этап обработки лазерного сканирования пока отличается низкой степенью автоматизации и высокой стоимостью программного обеспечения (ПО), что является минусом технологии.

В различных работах , например в работе [82], также предлагались варианты использования двух технологий сбора данных для моделирования ОН.

Подход, описанный в указанной работе, утилизирует технологию фасадной съемки тахеометром и объединенной надирной и перспективной аэрофотосъемки. Таким образом, дополняя материалы аэрофотосъемки (АФС) данными с тахеометра, получается целостная 3D-модель ОН. Однако для случаев, когда объект обладает большими по площади или количеству выдающимися конструктивными элементами съемки, процесс, реализованный по описанному методу, будет сильно растянут по времени, а результат потеряет в информативности за счет неполноты части модели, полученной по данным с тахеометра.

Перечисленные подходы уже рассматривались подробнее в работе [33], из которой можно сделать вывод, что применение комбинации наземных и воздушных методов геодезии позволяет охватывать наибольшее разнообразие встречающихся ситуаций.

Авторы в работе [203] предлагают использовать триангуляционную нерегулярную сеть (TIN) для моделирования геометрии и топологии трехмерных кадастровых объектов, что аргументирует осуществимостью предложенного решения.

В работе [77] авторы используют также данные наземного лазерного сканирования и создают упрощенную трехмерную модель городской территории.

Как мы уже рассматривали, с помощью различных методов сбора данных можно создавать трехмерные модели в различных средах. Форматы данных могут быть файлом SketchUp, файлом AutoCAD, файлом 3D Max и файлом координат в формате Excel или файлом CityGML согласно работе [128].

Создаваемые и хранимые в будущей кадастровой системе модели должны обеспечить правильный пространственный анализ, поэтому необходимо множество правил валидации и проверки семантических данных и трехмерных моделей. Все это, а также реализация более сложных инструментов и алгоритмов в системе трехмерного кадастра и далее систем управления земельными ресурсами в парадигме «умного города», может быть решено с помощью моделирования на основе облаков точек, поскольку, как было показано в разделе 2, облака точек могут быть использованы и для топологического (CityGML) и геометрического моделирования (IFC), что согласуется с требованиями к моделированию ОН, входящих во **вторую** и **третью** категории.

Наиболее современными и при этом доступными геодезическими методами сбора пространственной информации об объектах для построения измерительных трехмерных моделей на основе плотных облаков точек является лазерное сканирование (ЛС) и аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов, поскольку именно эти два метода в совокупности могут охватить все возникающие ситуации пространственной организации ОН, входящих во вторую и третью категории.

Учитывая рассмотренные наиболее популярные и инновационные подходы к сбору трехмерных пространственных данных с целью задач моделирования ОН для ЕГРН, предлагается в рамках данной работы остановиться на совмещении подходов, которые дают наибольшую информативность и исключают слабые стороны друг друга. По мнению автора, наилучшим образом такую задачу решает совмещение АФС, проводимой с использованием БПЛА, и данных наземного и мобильного лазерного сканирования.

Важно отметить, что в кадастровую практику уже вошли методы наземного и мобильного сканирования в силу более раннего развития, что отличает их от технологии воздушного лазерного сканирования, которая на данный момент является все еще чрезмерно дорогостоящей, а на рынке геодезических приборов представлены, в основном, первые ревизии опытных разработок [27, 15].

Разработка рекомендаций применения мобильного лазерного сканирования особенно актуальна в условиях все более смещающегося акцента на глубокий экологический мониторинг состояния среды в городской черте, что в паре с активным внедрением нейронных сетей для автоматизации процесса анализа вегетационных характеристик [137], создания автономных имитационных моделей для комплексной оценки и предоставления экосистемных услуг [24] подкрепляет необходимость более подробного учета и регистрации зеленых территорий внутри населенных пунктов. К примеру, в апреле 2021 г. представители стран Евросоюза завершили согласование нового климатического законодательства ЕС, которое подразумевает сокращение выбросов парниковых газов на 55 % к 2030 г. по сравнению с 1990 г. и выход Евросоюза на полную углеродную нейтральность к 2050 г. [42].

С помощью лазерного сканирования и цифровой фотокамеры возможно определять следующие характеристики:

- видовой состав насаждений;
- диаметры ствола на любой высоте без валки дерева;
- высоту деревьев;
- площадь проекции кроны;

- вертикальную и горизонтальную протяженность кроны;
- наличие пороков и повреждений древесины вредителями [126].

Опираясь на производственный опыт, литературные источники и методические указания, автором сделан вывод о целесообразности решения поставленной технической задачи следующими образом.

1 Необходимо исследовать методику расчета оптимальных параметров для выполнения аэрофотосъемки с БПЛА и ее обработки для создания трехмерных измерительных моделей для задач 3D-кадастра и 3DLAS.

2 Требуется проанализировать технологию выполнения наземного и мобильного лазерного сканирования и разработать технические рекомендации для задач 3D-кадастра и 3DLAS.

3 Разработать методику объединения данных АФС с БПЛА и НЛС для получения трехмерных моделей под форматы CityGML и IFC для задач 3D-кадастра и 3DLAS.

4 Выполнить оценку точности полученных моделей и проконтролировать их соответствие текущим требованиям ЕГРН.

5 Составить технологическую схему выполнения типовых работ и предложить методические рекомендации к организации топографогеодезических работ для создания 3D-моделей урбанизированных пространств под стандарты CityGML и IFC для задач 3D-кадастра, 3DLAS и «умного города».

3.2 Разработка методики моделирования урбанизированных пространств

Переходя непосредственно к разработке поставленных в предыдущем подразделе направлений, важно соблюсти логику и технологическую согласованность экспериментальных испытаний. Таким образом, отметим, что выбранные геодезические технологии, которые должны отвечать требованиям будущего 3D-кадастра и 3DLAS, одинаково зависимы от элементов привязки к пунктам ГГС. Подразумевается, что и АФС, и НЛС будут независимо ориентированы в государственную систему координат для получения абсолютных координат объекта моделирования,

соответствующих требованиям текущего законодательства. При этом используемая непосредственно на объекте геодезическая опорная сеть должна отвечать нескольким требованиям.

1 Координаты пунктов опорной сети должны быть определены с точностью не грубее пунктов ОМС-1 (СКП = 5 см), так как речь идет о моделировании ОН на урбанизированных территориях.

2 Внешний вид пунктов опорной сети должен удовлетворять требованиям к опознакам, используемым для привязки результатов АФС с БПЛА, получаемым в разных масштабах.

3 Внешний вид пунктов опорной сети также должен удовлетворять требованиям к опознакам, используемым для привязки результатов НЛС в МСК объекта.

4 И самый важный элемент требований к внешнему виду пунктов опорной сети – они должны удовлетворять требованиям к объединению результатов НЛС и АФС.

5 Расположение опорных пунктов съемочной сети должно быть на уровне земли и равномерным по всей площади объекта моделирования.

Анализируя выдвинутые требования к опорной сети при проведении кадастровых работ по моделированию ОН для задач 3D-кадастра и 3DLAS с использованием НЛС и АФС с БПЛА, можно сделать вывод, что для определения координат пунктов такой сети подходят методы тахеометрического хода и спутниковых наблюдений в режиме RTK, в зависимости от обстоятельств местности.

Требования по внешнему виду опознаков удалось удовлетворить, проведя литературный обзор и полевой эксперимент. Сравнение распространенных в геодезической практике пластиковых тарелочек диаметром 20 см и опознака собственного изготовления (диаметром 30 см), приведено на рисунке 3.1, а. В рамках данного эксперимента было выявлено падение точности построения ортофотоплана при использовании малоконтрастных опознаков в виде пластиковых тарелочек (при проекции пикселя на местность (далее GSD), равной 1 см), подобные опознаки неудовлетворительно показали себя на этапе сканирования и объединения данных, также

эти опознаки реже обнаруживались автокоррелятором в ПО AgisoftMetashape, что сказалось на продолжительности камеральной обработки материалов АФС. Данные по точности будут представлены в таблице 3.5. Таким образом в качестве опознака, закрепляющего пункты опорной сети для моделирования ОН для целей 3D-кадастра, был принят опознак, представленный на рисунке 3.1, б.

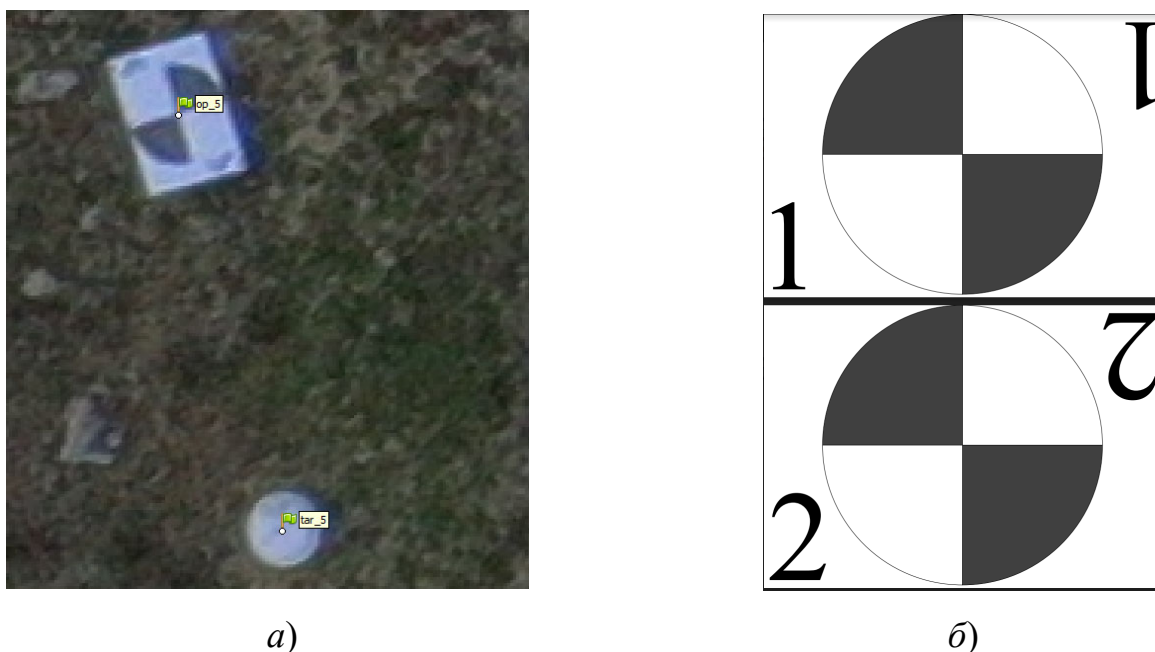


Рисунок 3.1 – Изображения опознаков:

- а) изображение опознаков на снимке с БПЛА при GSD = 1 см;
- б) изображение опознака для опорной сети

Для надежного отождествления на снимках и осуществления привязки, а также удовлетворения условий НЛС опознак предлагается изготавливать на пенокартоне формата А3 (297 × 420 мм) толщиной 5 мм, покрытом сатиновой бумагой. Закрепляется такой опознак на любой горизонтальной поверхности шпильками в углах пенокартона, а координируется непосредственно центр изображения. Именно такой формат опознака показал себя необходимым и достаточным техническим средством для успешного выполнения АФС, НЛС и объединения данных.

Описанная методика создания и закрепления опорной сети для АФС и НЛС учитывает, что наборы данных, полученных при АФС и НЛС, имеют разные характеристики облаков точек. Облако точек, созданное из изображений, полученных

в результате АФС с БПЛА, предоставляет полный набор трехмерных данных, включая стеклянные и отражающие поверхности, по сути является неструктурированным облаком точек, поскольку оно создается на основе местоположения и других характеристик фотографических данных. С другой стороны, облако точек, получаемое при НЛС, является более структурированным и плотным облаком точек с некоторыми пропусками, поскольку создается на основе механического вращения сканера вокруг вертикальной оси и отклонения зеркала вокруг горизонтальной оси, а пропуски возникают из-за преград на пути импульса и зеркальных поверхностей.

Таким образом, в методику применения аэрофотосъемки и наземного лазерного сканирования должно войти контролируемое допущение о соотносимости характеристик получаемых плотных облаков точек, выражаемое через расчет оптимальных параметров АФС и детальности создаваемых облаков точек для НЛС.

Для решения поставленных задач важно выполнять АФС с наилучшим разрешением снимков, доступным для используемой на БПЛА камеры, и условий съемки. Разрешение снимков складывается из разрешения объектива и разрешения светочувствительной матрицы [49].

Поэтому для разработки методики сбора трехмерных пространственных данных для моделирования урбанизированных территорий необходима, в первую очередь, процедура определения оптимальных параметров АФС для конкретного моделируемого объекта, текущих условий съемки, удовлетворяющих задачам 3D-кадастра.

Экспериментальная апробация этой процедуры была проведена с использованием БПЛА DJI Mavic 2 Pro (характеристики камеры приведены на рисунке 3.2).

Модель камеры	Разрешение	Фокусное р-е	Размер пикселя
L1D-20c (10.26mm)	5472 x 3648	10.26 мм	2.41 x 2.41 мкм

Рисунок 3.2 – Характеристики камеры БПЛА DJI Mavic 2 Pro

Согласно описанной в работе [49] методике использовались специально созданные тест объекты – миры (см. пример на рисунке 3.3), которые служили для количественного определения разрешения снимков с БПЛА. Для удобства измерения диаметра кружка нерезкости на снимках использовались миры с разной интенсивностью черного цвета (100, 65, 30 %) и количеством штрихов (32, 16, 8). Здесь под термином «кружок нерезкости» понимается центральная зона миры на снимке, в которой радиальные штрихи невозможно отделить друг от друга [49]. Все 9 мир были изготовлены на пенокартоне формата А3 (297 × 420 мм) толщиной 5 мм, покрытом сатиновой бумагой, и разложены на одной плоскости, зафиксированы шпильками. Так как на итоговое разрешение снимка влияет совокупность инструментальных параметров (объектив, матрица), настроек фотографирования (экспозпара) и обстоятельств съемки (освещенность, контрастность местности), на высоте планируемой аэрофотосъемки были сделаны несколько снимков при различных настройках фотографирования, результаты представлены на рисунке 3.3 и в таблице 3.1.

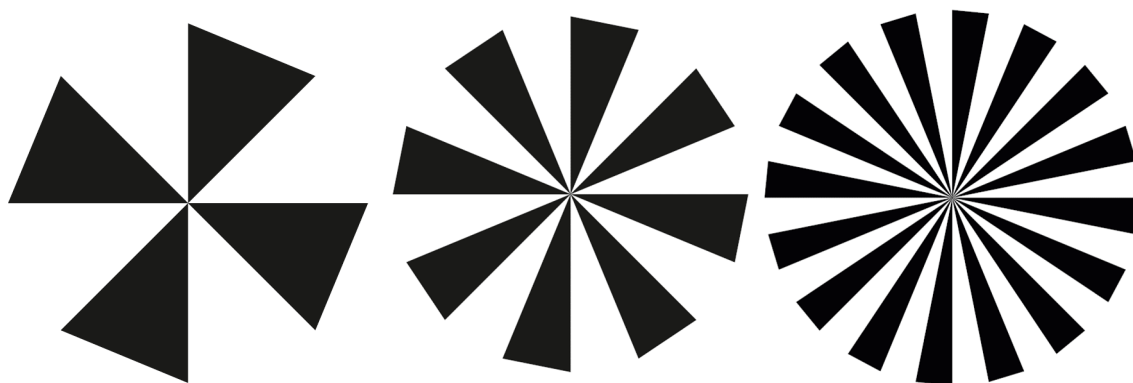


Рисунок 3.3 –Пример использованных мир 8 штрихов, 16 штрихов, 32 штриха

Апробация процедуры расчета оптимальных параметров выполнялась на рассчитанной высоте, планируемой АФС, при назначенном $GSD = 1$ см. Первый этап эксперимента подразумевал фотографирование с назначенным средним диафрагменным числом (для БПЛА DJI Mavic 2 Pro это 8) из доступного ряда и последовательного изменения ступени выдержки с шагом через 2. Сначала фотографирова-

ние было проделано с отключенной автофокусировкой, на высоте, соответствующей высоте планируемой аэрофотосъемки, а потом с автофокусом. На каждом этапе при каждой настройке делалось два снимка на случай ошибки записи, а снимки сохранялись на предварительно отформатированную флеш-карту в форматах JPEG максимального разрешения и RAW. Формат RAW является предпочтительным форматом для записи данных любой съемки, поскольку производит обратимую компрессию радиоволновой информации принятой матрицей – это выгодно отличает его от JPEG.

Второй этап эксперимента подразумевал проверку целесообразности использования автоматического расчета выдержки по заданному диафрагменному числу.

Третий и четвертый этапы состояли в проверке наиболее популярных параметров съемки, применяемых на производстве, выявленных путем личного опроса геодезистов.

Таблица 3.1

Запись в RAW и JPEG max							
Нсъемки = Нфото = 40 м GSD = 1 см							
	диафрагма = 8	ID фото			диафрагма	выдержка	ID фото
	выдержка	ручной фокус	автофокус				
1-й этап ISO 100	1/100	1	22	2-й этап ISO 100	4	1/200	11
	1/160	3	24		5,6	1/100	13
	1/240	5	26		8	1/50	15
	1/400	7	28		11	1/25	17
	1/640	9	30				
3-й этап	выдержка 1/800	18	ISO 100	4-й этап ISO 100	диафрагма	выдержка	
	диафрагма = 5,6	20	ISO 200		3,5	1/500	32
	EV = -0,7				3,5	1/400	34
	на высоте съемки фокус на землю				3,5	1/320	36
	ISO = 100–200				автофокус		

Оценка результатов эксперимента проводилась по следующим критериям:

1 Изображения трех мир оценивались на глаз для выявления среднего по размеру кружка нерезкости.

Было установлено, что при визуальной оценке можно с достаточной достоверностью определить кружок нерезкости, а значит, для непосредственного измерения разрешающей способности будет удобно использовать изображение именно такой миры. В нашем эксперименте это была 16-штриховая мира. На 8 штрихах кружок нерезкости был слишком маленький, а на 32 занимал слишком большую площадь миры, чтобы измерения были точными. Вычисления производились по следующей формуле:

$$R = \frac{N}{\pi \cdot D}, \quad (3.1)$$

где N – количество пар штрихов тест объекта, согласно ГОСТ 13.1.701–95. Репрография. Микрография. Тест-объекты для контроля качества микроизображения. Типы. Методы контроля;

D – диаметр кружка нерезкости в миллиметрах;

π – математическая постоянная, равная отношению длины окружности к её диаметру;

Высота планируемой аэрофотосъемки вычислена по формуле согласно методике из работы [60]:

$$H = \frac{f \cdot R}{p}, \quad (3.2)$$

где f – фокусное расстояние съёмочной камеры, мм;

R – пространственное разрешение на местности ($GSD=1$ см), м;

p – физический размер пикселя светочувствительной матрицы цифровой камеры, мкм.

С использованием основной фотограмметрической формулы определен масштабный коэффициент планируемой аэрофотосъемки для вычисления размера миры на плоскости матрицы камеры. Диаметр миры на местности составляет 36 см, масштабный коэффициент составил $\frac{1}{4\,000}$, таким образом размер миры на плоскости матрицы составляет 0,1 мм. Оценив долю кружка нерезкости от размера миры, воспользуемся формулой (3.1) для вычисления разрешения, результаты представ-

лены в таблице 3.2. Планируемая аэрофотосъемка и проводимый эксперимент не подразумевают работу с частотной гистограммой и построение радиометрических индексов поэтому достаточно для проведения сравнительного анализа полученных снимков на экране монитора компьютера.

Таблица 3.2

Диаметр миры физической, на плоскости матрицы	Тест-объект мира, штрихи	Кружок нерезкости	Кружок нерезкости, мм	Разрешение, линия/мм
36 см / 0,1 мм	8	1/7	0,014	178
	16	1/5	0,020	255
	32	1/2	0,050	204

Наименьший диаметр кружка нерезкости при наилучшем разрешении на 16 штриховой мире говорит об оптимальности параметров съемки.

2 Общие изобразительные характеристики полученных снимков оценивались на глаз.

Всего было сделано 37 снимков, из них были отобраны два, представленных на рисунке 3.4. Оптимальные параметры АФС, представленные на рисунке 3.5, были выбраны по приведенной методике.

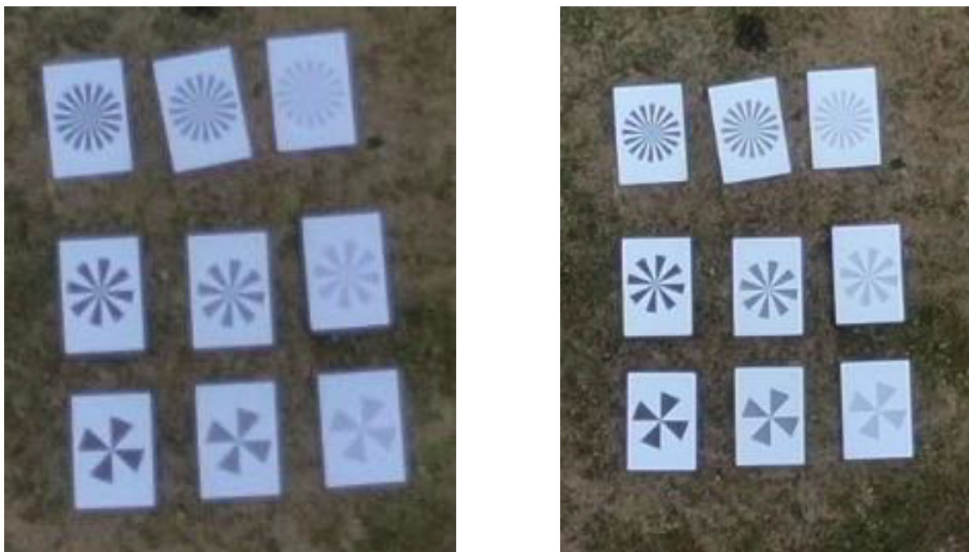


Рисунок 3.4 – Снимки на наилучших параметрах при ручном фокусе слева (№ 5) и автоматическом фокусе справа (№ 26)

В общей сложности расстановка мир, выполнение съемки и оценка снимков заняли не более 30 минут.

Подобранные параметры АФС	
ISO	100
Диафрагма	8
Выдержка	1/240
автофокус	
Нсъемки	40 м
GSD	1 см
Уполета	3 м/с
Запись в RAW и JPEG max	

Рисунок 3.5 – Оптимальные параметры АФС для планируемой съемки

Исходя из опыта, нужно отметить, что при быстрых изменениях погодных условий подобранные параметры могут потерять актуальность, особенно в случае сильного изменения освещенности объекта, однако так как нас интересует моделирование самих объектов, то более благоприятным исходом будут недостаточно экспонированные снимки. В случае необходимости обработка результатов фотографирования в ПО Adobe Photoshop для доведения снимков возможна на следующих этапах.

Таким образом, результаты эксперимента показали, что представленная методика позволяет достигать искомый результат – подбирать оптимальные параметры для АФС для задач 3D-кадастра и 3DLAS, где наибольшую важность имеет точность в пределах требований ЕГРН, детальность получаемых моделей и обеспечение возможности объединения с отличными по структуре данными лазерного сканирования.

Для технических рекомендаций по совершенствованию методики кадастровых работ для моделирования ОН описанную методику можно представить в виде таблицы эксперимента (таблица 3.3), а набор мир может быть загружен по общедоступной ссылке в сети Интернет (https://drive.google.com/file/d/10e7T5q_iN9Mr3V6oXUkf0Bvsgxsj78Yv/view?usp=sharing).

В кадастровой практике предлагается использовать упрощенную схему эксперимента, представленную в таблице 3.3.

Она подразумевает использование разных неметрических камер, устанавливаемых на БПЛА мульти роторного типа.

Таблица 3.3

Запись в RAW и JPEG max						
Н съемки = Н эксперимента = м; GSD = см						
1-й этап ISO 100	диафрагма = 8	автофокус	2-й этап ISO 100	диафрагма	выдержка	ID фото
	выдержка	ID фото				
	1/100			4	1/200	
	1/160			5,6	1/100	
	1/240			8	1/50	
	1/400			11	1/25	
	1/640		автофокус			
3-й этап ISO 200	диафрагма = 8	автофокус	4-й этап ISO 200	диафрагма	выдержка	ID фото
	выдержка	ID фото				
	1/100			4	1/200	
	1/160			5,6	1/100	
	1/240			8	1/50	
	1/400			11	1/25	
	1/640		автофокус			

Основная идея эксперимента состоит в последовательной проверке разных комбинаций настроек экспопары, начиная со средней ступени диафрагменного ряда конкретной камеры при включенном автофокусе и уровне чувствительности матрицы (ISO), равном 100, на 1-м этапе расчета параметров АФС, заканчивая перебором автоматически выставляемых пар диафрагма-выдержка с ISO 200 на 4-м этапе. Получаемые снимки по описанной выше логике оцениваются по величине кружка нерезкости, и таким образом выбираются оптимальные параметры для планируемой АФС. Проекция пикселя на местность (GSD) назначается, исходя из особенностей объекта моделирования и с учетом необходимости связывать данные АФС с НЛС. Не рекомендуется назначать GSD более 3–4 см. Опыт показал, что в таком пределе отождествление изображения опознаков, предлагаемых в настоящей работе на данных АФС и НЛС, наиболее благоприятно сказывается на качестве конечного результата. Высота планируемой съемки вычисляется, а эксперимент

должен производиться на такой же высоте и желательно в обстоятельствах, характеризующих средние свойства всего моделируемого объекта.

Рассмотрим саму методику выполнения и обработки АФС: так как детальность структурированного облака точек, получаемого в результате наземного лазерного сканирования, зависит от плотности сканирования и в любом случае превышает детальность неструктурированных данных АФС, необходимо добиться максимально возможных близких по уровню детальности наборов данных. Как показано в работе [61], исходя из размера самой маленькой детали моделируемого объекта, оптимальная плотность сканирования, которая обеспечит требуемую детальность будущей 3D-модели, составит половину размера такой детали. Можно сделать вывод, что для создания трехмерной модели ОН на уровне детализации LoD3 и подходящем для определения координат характерных точек границ необходимо, чтобы исходные данные:

- 1) давали четкое представление о материалах и конструктивных особенностях зданий;
- 2) обеспечивали точность определения местоположения характерных точек границ ОН с не менее 10 см, согласно требованиям ЕГРН.

Достижение таких условий возможно при планировании маршрутов съемки с заданным продольным и поперечным перекрытием снимков не менее 80 %, скорость полета дрона (из опыта) не должна превышать 5 м/с для исключения смаза изображений. Выбранные параметры АФС обеспечивают нормативную точность в 0,1 м для характерных точек ОН, а задаваемое значение проекции пикселя на местность обеспечит требуемую детальность модели и изображений связующих опознаков для объединения с данными НЛС [58].

Запись снимков рекомендуется делать в формате RAW и при обработке в наиболее распространенном на геодезическом производстве фотограмметрическом ПО Agisoft Metashape следует конвертировать снимки в формат TIFF (Tagged Image File Format). Обработка данных на этапе выравнивания фотографий (по терминологии документации программы) рекомендуется (из опыта) на настройках,

представленных на рисунке 3.6. После расстановки опознаков на фотографиях и оптимизации камер вычисляют точность положения опорных и контрольных точек. Последним этапом обработки данных АФС создается плотное облако точек при агрессивной фильтрации карты глубины и выгружается файл с сохранением привязки в формате .las.

Параметры выравнивания	
Точность	Очень высокая
Общая преселекция	Да
Преселекция по привязке	Да
Характерных точек на кадр	60,000
Связующих точек на кадр	8,000
Адаптивное уточнение модели камеры	Да

Рисунок 3.6 – Параметры выравнивания

Описанная методика расчета оптимальных параметров АФС и последовательность технических действий и методических рекомендаций к выполнению и обработке данных для целей 3D-кадастра и 3DLAS была апробирована на объекте, относимым автором к 3-й категории ОН, находящимся на территории СНТ с видом разрешенного использования (ВРИ) индивидуальное жилищное строительство. Это участок площадью 6 038 м², расположенный под небольшим уклоном, с малоэтажной застройкой.

В весеннее время был выполнен ряд экспериментов с использованием в качестве опознаков распечатанных на полипропилене секторных черно-белых марок диаметром 30 см, а также пластиковых тарелочек диаметром 20 см. На территории объекта было закреплено 13 опознаков (марки и тарелочки), а также два центра люков колодцев, которые были закоординированы с помощью ГНСС-приемника PrinCe i50 в режиме RTK. Схема расположения опознаков показана на рисунке 3.7, а каталог координат с погрешностями определения представлен в таблице 3.4.

Аэрофотосъемка производилась с использованием БПЛА DJI Mavic 2 Pro с параметрами, указанными в таблице 3.2, и продольным и поперечным перекрытием не менее 80 %, управление осуществлялось через мобильное приложение Drone De-

рлю. Было получено 734 снимка, общее время, потраченное на фотографирование, составило 15 минут.



Рисунок 3.7 – Схема расположения опознаков на территории ИЖС

Таблица 3.4

МСК 50 зона 2						
№	Точка	X	Y	H	СКО план	СКО высота
1	op_24	2226214,710	484176,360	143,125	0,006	0,009
2	tar_24	2226215,964	484175,606	143,140	0,006	0,009
3	op_18	2226249,706	484150,137	143,488	0,006	0,009
4	op_16	2226250,994	484151,956	143,419	0,006	0,009
5	op_17	2226252,676	484150,688	143,402	0,006	0,009
6	kolodec_1	2226247,091	484163,782	143,199	0,005	0,009
7	kolodec_2	2226246,985	484165,062	143,197	0,005	0,009
8	mir_100	2226251,310	484148,334	143,483	0,006	0,010
9	mir_65	2226252,001	484148,255	143,464	0,006	0,010
10	mir_30	2226252,604	484148,315	143,421	0,006	0,010
11	op_25	2226288,154	484126,849	142,986	0,006	0,009
12	tar_5	2226216,813	484120,591	144,635	0,005	0,009
13	op_5	2226218,049	484120,878	144,615	0,005	0,009
14	op_9	2226188,499	484119,801	145,089	0,005	0,009
15	tar_9	2226188,224	484120,140	145,077	0,005	0,009

Обработка материалов АФС производилась в ПО Agisoft Metashape Professional 1.5.5 build 9097 (64 bit). После конвертации снимков выравнивание заняло 20

минут. Расстановка опознаков на фотографиях и оптимизация камер заняли 30 минут. Вычисленная точность положения опорных и контрольных точек представлена в таблице 3.5. В качестве контрольных точек использовались тарелочки диаметром 20 см и один колодец. Как видно из таблицы, погрешность на точках, закрепленных тарелочками, в среднем больше, чем при использовании опознаков более крупного размера.

Создание плотного облака точек и выгрузка с привязкой в формате .las, при настройках, описанных в методике, заняли 7 часов. Общее время подготовки, фотографирования и обработки результатов АФС составило 8 часов 35 минут. Важно отметить, что время, затрачиваемое на обработку, сильно зависит от объема материалов и вычислительных мощностей, а точнее от размера оперативной памяти и частоты процессора.

Таблица 3.5

Опорные точки					
№	Название	Ошибка, X (см)	Ошибка, Y (см)	Ошибка, Z (см)	Общая (см)
1	op_25	-0,4	0,6	-2,0	2,1
2	op_5	0,0	0,2	-4,8	4,8
3	op_9	-1,0	0,8	3,4	3,6
4	op_18	-0,6	-1,2	1,7	2,1
5	op_16	0,5	0,6	2,6	2,7
6	op_17	0,2	-1,0	1,1	1,5
7	kolodec_1	1,0	-0,1	1,1	1,5
8	op_24	-0,4	0,4	-2,3	2,4
9	Общая	0,7	0,7	3,1	3,3
Контрольные точки					
№	Название	Ошибка, X (см)	Ошибка, Y (см)	Ошибка, Z (см)	Общая (см)
1	tar_5	0,2	1,8	-8,2	8,4
2	tar_9	-0,8	2,8	2,1	3,6
3	tar_100	-1,1	-6,5	1,7	6,8
4	tar_65	-0,9	-2,8	0,8	3,0
5	tar_30	0,8	-2,2	1,0	2,6
6	kolodec_2	1,8	-0,2	0,4	1,8
7	tar_24	1,2	-0,1	-1,9	2,3
8	Общая	1,2	2,6	4,7	5,5

Продемонстрированная совокупность технических решений и методик показали свою состоятельность для сбора пространственных данных для задач 3D-кадастра и 3DLAS в части соответствия требованиям по точности и детальности материалов. Полученное плотное облако точек представлено на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Плотное облако точек по результатам АФС на территорию ИЖС, содержит 18 миллионов точек (278 мб)

Следующей частью разрабатываемой методики кадастровых работ для моделирования ОН для 3D-кадастра и 3DLAS стало исследование возможностей применения наиболее дешевых и современных сканеров:

- 1) наземного лазерного сканера Leica BLK360 (стоимость на 18.02.2022 – 1 500 000 рублей);
- 2) носимого лазерного сканера GeoSLAM ZEB-HORIZON 3D Mobile Scanner (стоимость на 18.02.2022 – 5 000 000 рублей).

Технические характеристики и внешний вид приборов представлены на рисунках 3.9 и 3.10.

Технические характеристики Leica BLK360

• Скорость сканирования	360 тыс. точек/сек
• Поле зрения (горизонт./ верт.)	360 / 300 градусов
• Диапазон измерения расстояний	от 0,6 м до 60 м
• Класс лазера	1
• Интерфейсы	Wi-Fi
• Внутренняя память	Более 100 сканов
• Вес	1 кг
• Пылевлагозащита	54 IP
• Встроенная HDR-фотокамера	Система из 3 камер по 15Мп. LED вспышка.
• Сканер BLK360 управляется посредством планшета iPad Pro 12.9".	

Облака точек ВЫСОКОГО разрешения содержат около 50-80 млн. точек. Измерения занимают не более 3 минут.

Погрешность результатов составляет до 6 мм на расстоянии 10 м и до 8 мм на расстоянии в 20 м.



Рисунок 3.9 – Технические характеристики наземного лазерного сканера BLK 360

Технические характеристики GeoSLAM ZEB-HORIZON



Максимальная дальность	100 м
Класс защиты	IP54
Обработка	Постобработка
Размещение накопителя данных	Рюкзак или плечевой ремень
Вес сканера	1,3 кг
Облако точек в реальных цветах	✓
Интенсивность	✓
Видео и фотографии	✓
Частота сканирования	300,000
Количество сенсоров	16
Автоматический запуск сканера	✓
Относительная точность	1 - 3 см*
Объем накапливаемых данных	100-200 МБ в минуту

Есть возможность установки сканера на БПЛА.

Рисунок 3.10 – Технические характеристики носимого лазерного сканера GeoSLAM ZEB-HORIZON 3D

Рассматриваемые приборы выбраны из соображений экономической доступности и широты функционального применения, поскольку большинство ОН, подлежащих трехмерному моделированию согласно определениям из второго раздела диссертационной работы, могут быть отсканированы либо с использованием ста-

ционного сканера, либо с использованием мобильного, что будет подтверждено апробацией далее.

Каждый прибор поставляется со своим набором программ обработки сырых данных, но технологическая цепочка сбора и обработки данных сканирования в целом не отличается и основными моментами повторяет известные этапы, как в работе [67].

Наземные лазерные сканеры фазового принципа измерения дальностей обладают сравнительно небольшим полезным радиусом действия, он рассчитывается по формуле из фундаментальной работы [31]:

$$S_{\text{полезное}} = h \cdot \text{ctg}(\beta), \quad (3.3)$$

где $\beta \geq 3^\circ$ предельный угол падения лазерного луча для сохранения диффузности отражения;

h – высота расположения сканера.

Исследованный прибор BLK 360 обладает малым весом и устанавливается на практике чаще всего на фотоштатив, который не обеспечивает горизонтирование и центрирование, а также подвержен вибрациям.

Согласно [46], вибрация оказывает основное влияние на дальномерные измерения, она вызывает хаотическое смещение лазерного пучка относительно заданного направления на точку сканирования и приводит к случайной амплитудной и фазовой модуляциям. Влияние случайного изменения амплитуды модулирующего сигнала из-за вибрации прибора эквивалентно воздействию мультипликативной помехи. Из-за вибрации НЛС при расстоянии от прибора до объекта от 20 до 30 м погрешность измерения расстояний увеличивается на 40–50 % по сравнению с ошибкой расстояния в случае отсутствия вибрации. Поэтому данный конкретный (BLK 360) прибор строго рекомендуется устанавливать на теодолитный штатив для минимизации погрешностей из-за вибрации.

Опыт показал, что для уменьшения мертвой зоны под сканером и оптимизации процесса сканирования удобнее всего устанавливать прибор на высоте не более 1,5 м, тогда полезное расстояние, рассчитанное по формуле (3.3), составит 29 м.

Однако, на практике прибор, устанавливаемый на таком расстоянии от сканируемого объекта и соответственно связующих марок, оказывается в условиях, когда автоматическая регистрация соседних сканов невозможна, а ручной процесс регистрации замедляет работу и часто осложнен недостаточным разрешением снимков фотосферы. Поэтому формула (3.3), разработанная на основе опыта использования других сканеров, в данном случае некорректно предусчитывает величину полезного радиуса действия прибора.

Из опыта полевых работ наиболее подходящая дистанция для выполнения сканирования этим прибором находится в диапазоне от 2 до 17 м в зависимости от высоты сканируемого объекта. При этом расстояния между сканерными станциями могут быть в таком же пределе или даже меньше в случае, если обстоятельства съемки напоминают «бутылочное горлышко», например, арочные и узкие проходы, нависающие конструктивные элементы или загромождающая растительность.

При выполнении сканирования наземным лазерным сканером BLK 360 необходимо использовать связующие марки, напечатанные на листах формата А4 в количестве, обеспечивающим видимость минимум трех марок с каждой пары соседних станций. Таким образом обеспечивается регистрация соседних сканерных станций в общий сканерный ход и сшивка отдельных облаков точек в общий файл.

Также из опыта полевых работ было выявлено существенное увеличение (почти втрое) частоты срабатывания автоматической регистрации соседних сканов при использовании связующих марок формата А4 с интенсивностью черного цвета закрашенных секторов, равной 70 %.

Для управления этим прибором используется планшетный компьютер iPad Pro 2019 с установленным ПО Autodesk Recap Pro. При создании проектов не рекомендуется сканировать больше 100 станций в один проект, так как на этапе выгрузки с планшета могут возникнуть ошибки и сбои в передаче данных.

Применение такого прибора оправдано в ситуациях, когда имеется ОН с небольшим количеством растительности и высотой не более 30 м. Не рекомендуется использовать такой сканер для протяженных и высотных сооружений. Для создания внутренней модели объекта сканер BLK 360 подходит.

Суммируя вышеописанные рекомендации по применению в поле наземного лазерного сканера BLK 360, отметим следующее:

- 1) этот сканер подходит для сканирования зданий и сооружений без растительности высотой до 30 м внутри и снаружи;
- 2) прибор необходимо всегда устанавливать на тяжелый теодолитный штатив для исключения вибраций;
- 3) расстояния между станциями и до объекта сканирования должны быть в промежутке от 2 до 17 м;
- 4) связующие марки должны быть размещены таким образом, чтобы обеспечивать видимость минимум трех штук с каждой пары соседних станций;
- 5) необходимо использовать связующие марки формата А4 с секторным рисунком с интенсивностью черного цвета 70 %.

В части обработки данных, полученных с этого прибора, технологическая цепочка обработки соответствует другим аналогичным приборам, для ее демонстрации и описания воспользуемся материалом полевого эксперимента на объекте апробации, относимым автором к 3-й категории ОН, находящимся на территории СНТ с видом разрешенного использования индивидуальное жилищное строительство. Это участок площадью 6 038 м², расположенный под небольшим уклоном, с малоэтажной застройкой.

На объекте апробации были размещены связующие марки согласно рекомендациям, в количестве 30 штук. Сканерный ход и величины базисов между станциями представлены на рисунке 3.11 и в таблице 3.6. Так как моделируемый объект находится в окружении заборов и растительности, было необходимо уменьшать базисы между станциями и делать дополнительные станции для сканирования по высоте объекта.

сложности на размещение марок и выполнение сканирования потребовался 1 час. Следование указанным выше рекомендациям позволило выполнять автоматическую регистрацию на всех стоянках сканера. Управление сканером выполнялось в программе Resap PRO mobile для Apple Ipad Pro. Отчет о качестве регистрации сканов представлен на рисунке 3.12.



scan name ▼	overlap	balance	points <6mm
dacha_dom_25.04.21 1	42.9%	28.8%	99.7%
dacha_dom_25.04.21 3	27.9%	31.4%	99%
dacha_dom_25.04.21 4	43.7%	23.2%	99%
dacha_dom_25.04.21 5	53%	31.7%	99.4%
dacha_dom_25.04.21 6	44%	43.3%	100.0%
dacha_dom_25.04.21 7	49%	13%	96.1%
dacha_dom_25.04.21 8	54.4%	6.5%	99.7%
dacha_dom_25.04.21 9	66.6%	20.5%	98.6%
dacha_dom_25.04.21 10	65.3%	74.4%	97.7%
dacha_dom_25.04.21 11	38%	64%	96.6%
dacha_dom_25.04.21 12	44.0%	50.9%	98.9%
dacha_dom_25.04.21 13	54.7%	48.5%	99.3%
dacha_dom_25.04.21 14	47.8%	57%	98.8%
dacha_dom_25.04.21 15	54.2%	40.9%	99.7%

Рисунок 3.12 – Отчет о качестве регистрации сканов

При работе со сканером BLK360 используются три параметра оценки качества регистрации (наложения) соседних сканов:

- 1) Overlap (перекрывание) – процент точек, которые совпадают на соседних сканах и могут быть использованы для регистрации скана (контроль: не менее 30 %);
- 2) Balance (баланс) – отражает качество элементов (или поверхностей), используемых для регистрации (контроль: не менее 20 %);
- 3) Points < 6 mm (точки СКО < 6 мм) – процент точек отклонившихся от своего положения на предыдущем скане меньше чем на 6 мм (контроль: 90–99 %).

Регистрация необходима для сведения сканов с разных станции в общую СК сканера. В камеральных условиях производится пересчет локальной системы координат в глобальную путем присвоения изображениям связующих опознаков геодезических координат, полученных из спутниковых определений, процесс представлен на рисунке 3.13.

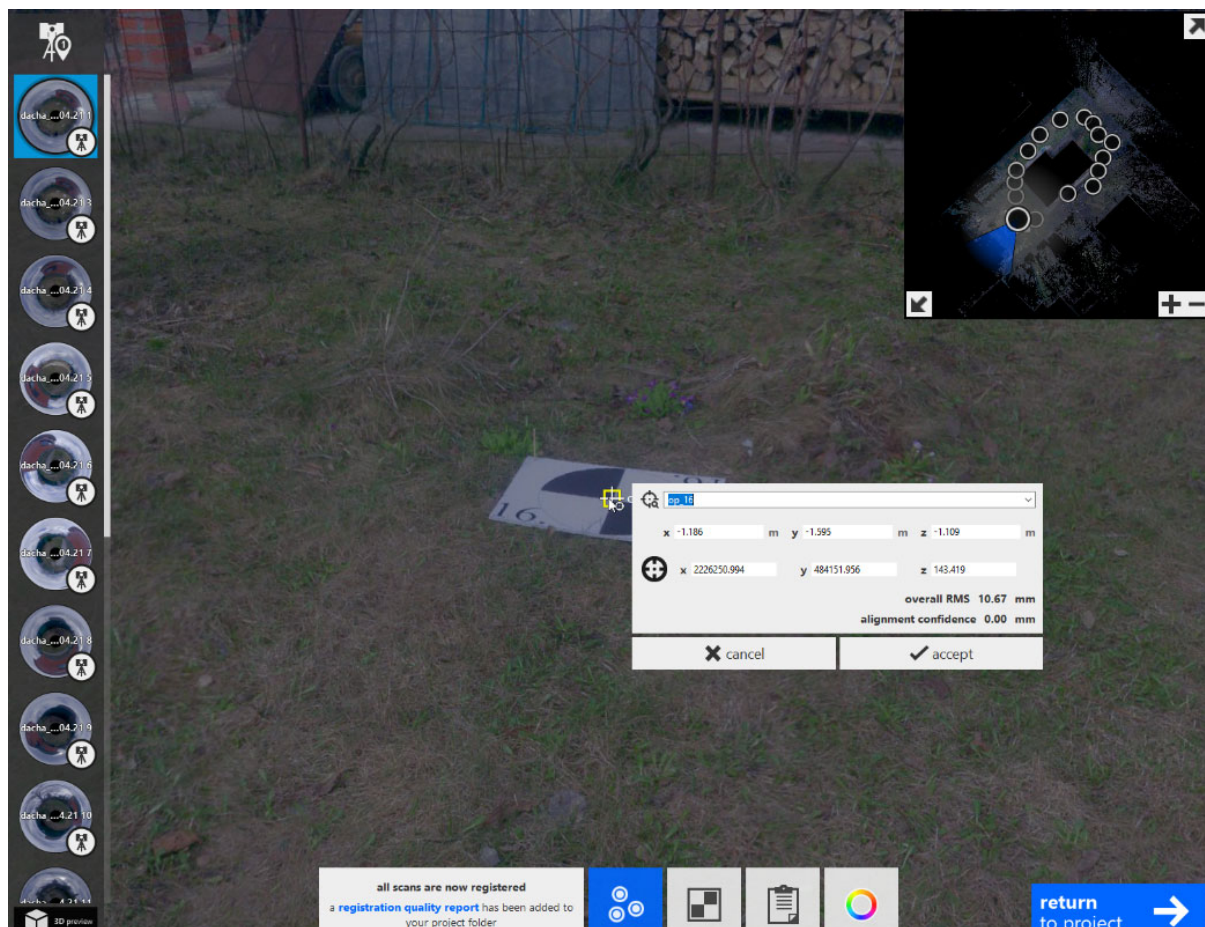


Рисунок 3.13 – Привязка сканов в глобальную систему координат МСК 50, зона 2

Отчет об ошибках привязки и вид связующих опознаков на облаке точек представлены на рисунках 3.14, 3.15. СКП привязки, подсчитанная в ПО Rescar PRO, не превышает 2 см. Рекомендуемый в методике размер связующих опознаков (распечатка на матовом полипропилене формата А3, диаметр марки 30 см) обеспечивает однозначное отождествление точек на облаке.

connections			targets		
scan location	target	RMS (noise)	target	gnment confiden	RMS (noise)
dacha_dom_25.04.21 1	op_18	10.74mm	op_18	10.83mm	7.89mm
dacha_dom_25.04.21 4	op_18	8.64mm	op_16	14.36mm	2.78mm
dacha_dom_25.04.21 3	op_18	4.29mm	op_17	4.24mm	2.04mm
dacha_dom_25.04.21 1	op_16	2.78mm			
dacha_dom_25.04.21 3	op_16	2.78mm			
dacha_dom_25.04.21 3	op_17	2.04mm			
dacha_dom_25.04.21 1	op_17	2.04mm			

Рисунок 3.14 – Отчет о привязке в глобальную систему координат МСК 50, зона 2

Привязанное облако точек было очищено от растительности и выгружено в формате .e57 для дальнейшей обработки и объединения в ПО открытого кода CloudCompare.



Рисунок 3.15 – Вид связующих опознаков на облаке точек

Плотное облако точек по данным НЛС содержит 82 миллиона точек (1,23 Гб) и представлено на рисунке 3.16.



Рисунок 3.16 – Плотное облако точек по данным НЛС

Рассматривая применения мобильного лазерного сканирования, важно отметить отличия данной технологии от наземного сканирования. В первую очередь, GeoSLAM ZEB-HORIZON отличается от BLK 360 самой технологией SLAM – simultaneous localization and mapping – это метод одновременной локализации и построения карты окружающего пространства, которая формируется за счет передачи данных об измеренных расстояниях и углах с непосредственно сканирующей системы на контролирующее устройство (планшетный компьютер) по средствам полевого сегмента программного обеспечения GeoSLAMHub.

Таким образом, процесс сбора пространственных данных этим прибором состоит в прохождении оператором маршрута вдоль объекта моделирования или петель вокруг этого объекта, то есть методика работы с мобильным сканером более адаптирована к протяженным или нестабильным условиям съемки. Также существует возможность маркировать специальные контрольные точки, которые позднее могут быть использованы для пространственной привязки. Для создания таких точек специалисту необходимо зафиксировать на ней прибор в течение 15 секунд и подать команду через управляющий планшет. После чего эти точки отображаются на создаваемом (рисунок 3.17) образе объекта на планшете в ПО GeoSLAMHub, что позволяет ориентироваться в условиях плохой видимости или сложной конфигурации объекта (например, лесопарковые насаждения или тоннели).

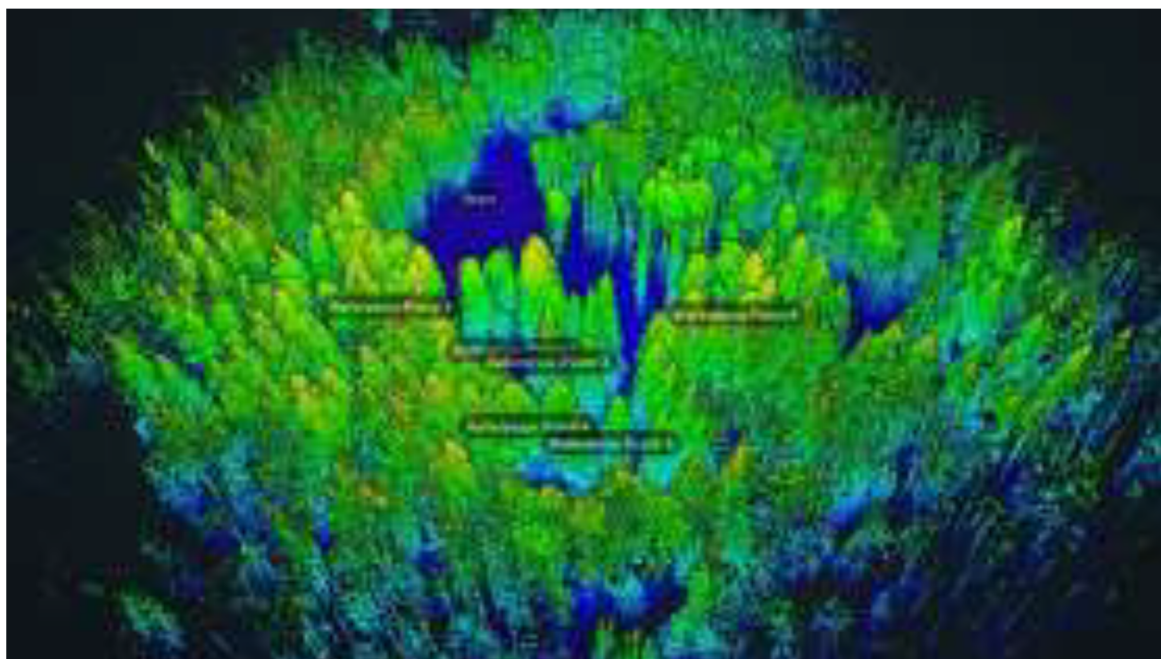


Рисунок 3.17 – Отображение контрольных точек на результате первичной обработки данных лазерного сканирования

Использование предложенных связующих опознаков, располагаемых на поверхности земли для последующего объединения с данными АФС, также применимо и для мобильного сканирования. Из опыта полевых работ вид и форма опо-

знаков удовлетворяют требованиям к отображению связующей точки на плотном облаке точек, полученном с GeoSLAM ZEB-HORIZON, а для упрощения работ рекомендуется на связующих опознаках фиксировать положение контрольных точек сканером. Таким образом обеспечится привязка в абсолютную систему координат.

Из опыта применения данного прибора при моделировании объектов недвижимости для целей кадастра можно сделать следующие выводы.

1 Применение GeoSLAM ZEB-HORIZON в маленьких закрытых помещениях с большим количеством деталей затруднено и нецелесообразно в силу большого количества шумов. Пример комплекта прибора и данных на лесопарковую зону показан на рисунке 3.18.

2 Важно настраивать перед началом работ регистрируемый интервал дальности сканирования в зависимости от типа объекта и обстоятельств съемки. Так, для объектов, содержащих большое количество насаждений, необходимо выбирать интервал от 2 до 40 м. Для линейных объектов типа дороги, тоннели или трубопроводы интервал сканирования может быть выставлен порядка 0,6–75 м. Окно настроек представлено на рисунке 3.19.

3 Длина сканерного хода или петли ограничена по времени записи и не должна превышать 30 минут на один файл. Из опыта, для лесопарковых объектов за 30 минут оператор успевает пройти не более 2 км.

4 Технология SLAM позволяет эффективно избавляться от слепых зон и разрывов в облаке точек, что выгодно отличает мобильное сканирование от наземного.

5 Комплектная фотокамера и фотографические данные, полученные с нее, значительно уступают по своим характеристикам данным с камер BLK 360, что не является критическим недостатком, но осложняет обработку.

6 Круг задач, решаемых с помощью GeoSLAM ZEB-HORIZON, ограничивается объектами недвижимости, свойства которых в общем виде сводятся к более низким точностным характеристикам и обладают меньшим количеством важных деталей, такими как: тоннели, лесопарковые территории, улично-дорожная сеть (1–3 полосы).

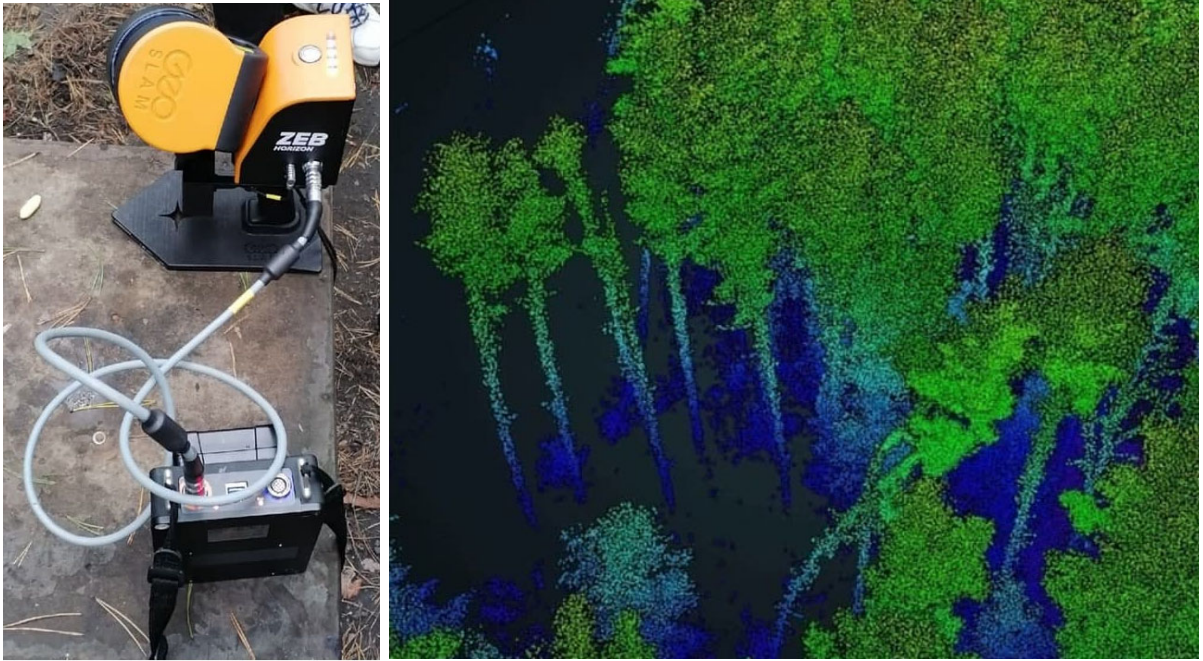


Рисунок 3.18 – Комплект прибора GeoSLAM ZEB-HORIZON
и пример данных на лесопарковую зону



Рисунок 3.19 – Окно выбора параметров мобильного сканирования
в ПО GeoSLAMHub

Схема проведения работ по лазерному сканированию представлена на рисунке 3.20.

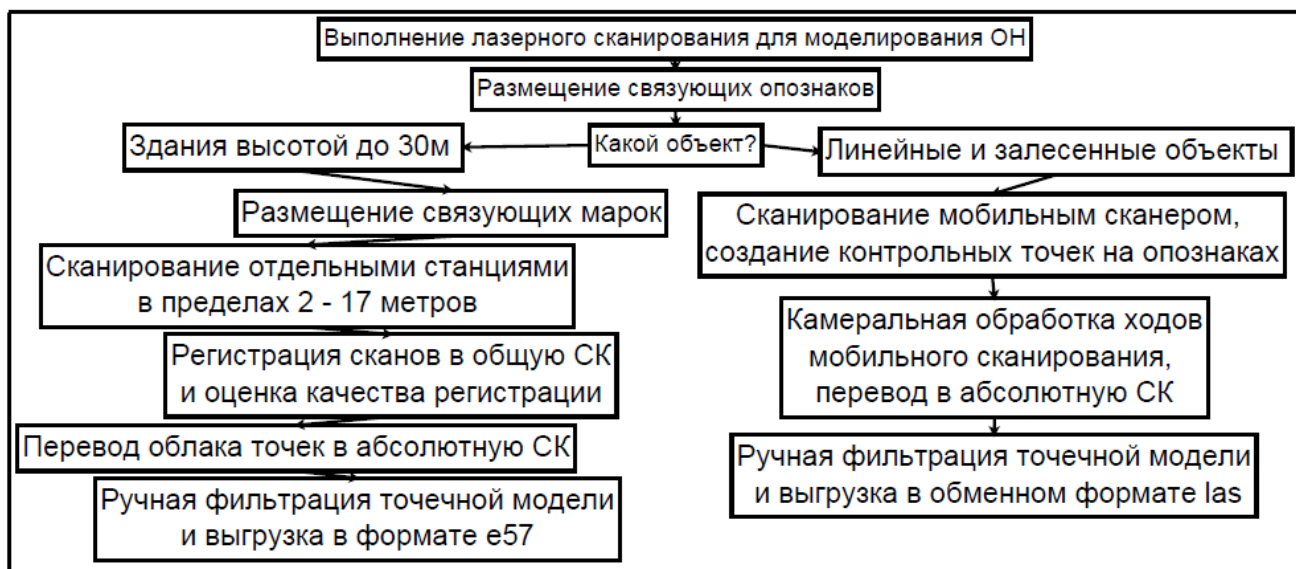


Рисунок 3.20 – Схема проведения работ по лазерному сканированию для задач 3D-кадастра

Следующий этап кадастровых работ по моделированию ОН на урбанизированных территориях подразумевает объединение данных АФС и лазерного сканирования. Есть разные подходы к решению этой задачи, но в целях экономической доступности и перспективы адаптации в рамках диссертационного исследования рассмотрены технологии, основанные на открытом коде, с использованием общедоступного ПО.

В качестве исходных данных для демонстрации процесса объединения НЛС и АФС используем результаты, полученные на объекте апробации, относимым автором к 3-й категории ОН, находящимся на территории СНТ с видом разрешенного использования индивидуальное жилищное строительство. Это участок площадью 6 038 м², расположенный под небольшим уклоном, с малоэтажной застройкой.

Перед непосредственным объединением необходимо выполнить фильтрацию исходных облаков точек для уменьшения количества изолированных точек и шума. В ПО открытого кода CloudCompare выполняем фильтрацию шума и упрощение об-

лаков точек для сокращения требований к вычислительным мощностям. Параметры фильтрации шумов определены опытным путем и представлены на рисунках 3.21 и 3.22. Для результатов АФС используется фильтр статистических выбросов, поскольку сами данные имеют меньший уровень шума.

Для данных НЛС используем фильтр шума из-за более высокой детальности съемки и наличия растительности на объекте апробации, так как уровень шума заметно выше, чем при аэрофотосъемке.

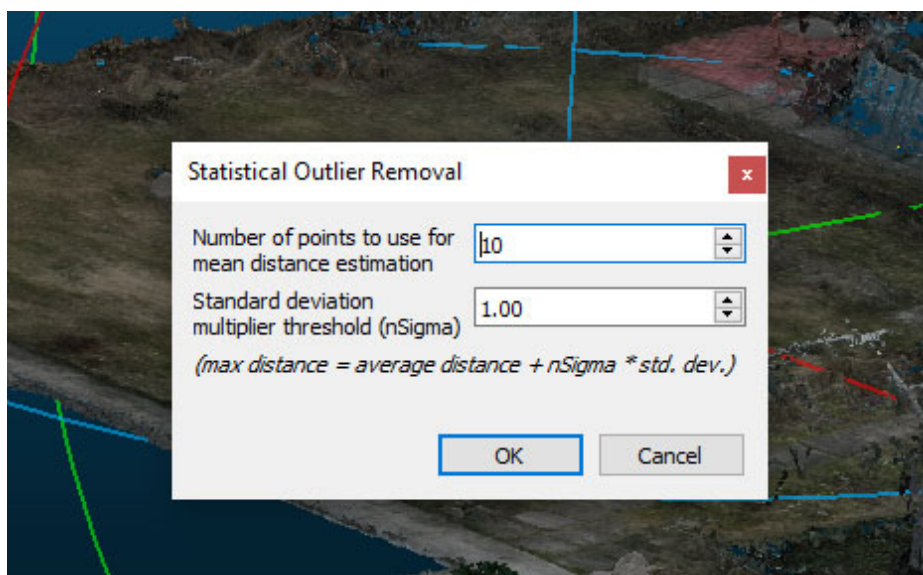


Рисунок 3.21 – Параметры фильтрации шума для АФС

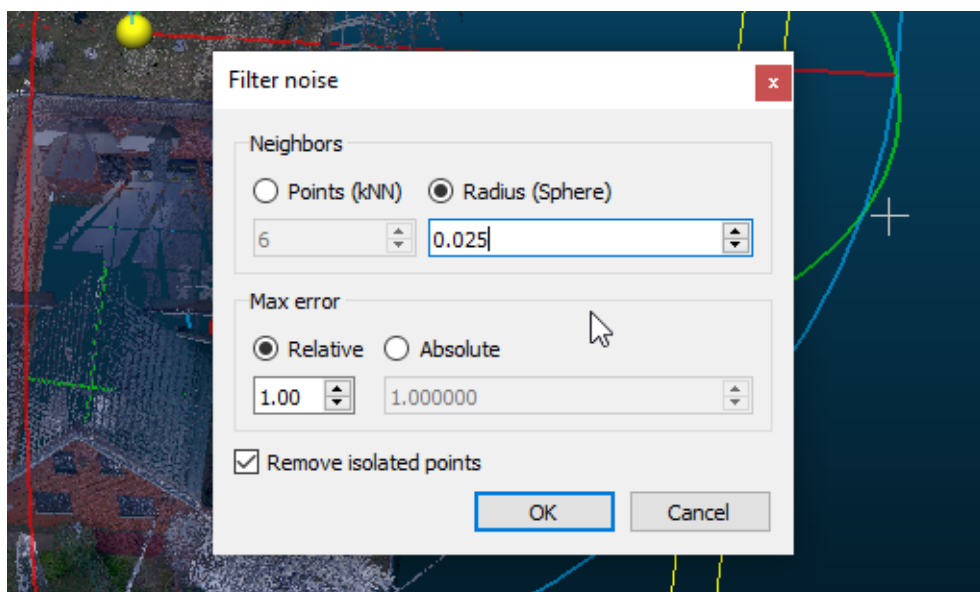


Рисунок 3.22 – Параметры фильтрации шума для НЛС

После фильтрации облако точек АФС содержит 17 млн точек, а облако НЛС после фильтрации сократилось до 39 млн точек.

Теперь можно переходить к объединению облаков, для этого оба они загружаются в корень рабочего пространства CloudCompare. На всех этапах сохраняется привязка, и облака существуют в глобальной системе координат, благодаря чему при загрузке обоих массивов точек они сразу размещаются вблизи друг друга на рабочей поверхности.

Процедура объединения выполняется с помощью встроенного инструмента CloudCompare с использованием изображения четырех связующих опознаков и одной дополнительной точки контура отмостки здания, процесс представлен на рисунке 3.23.

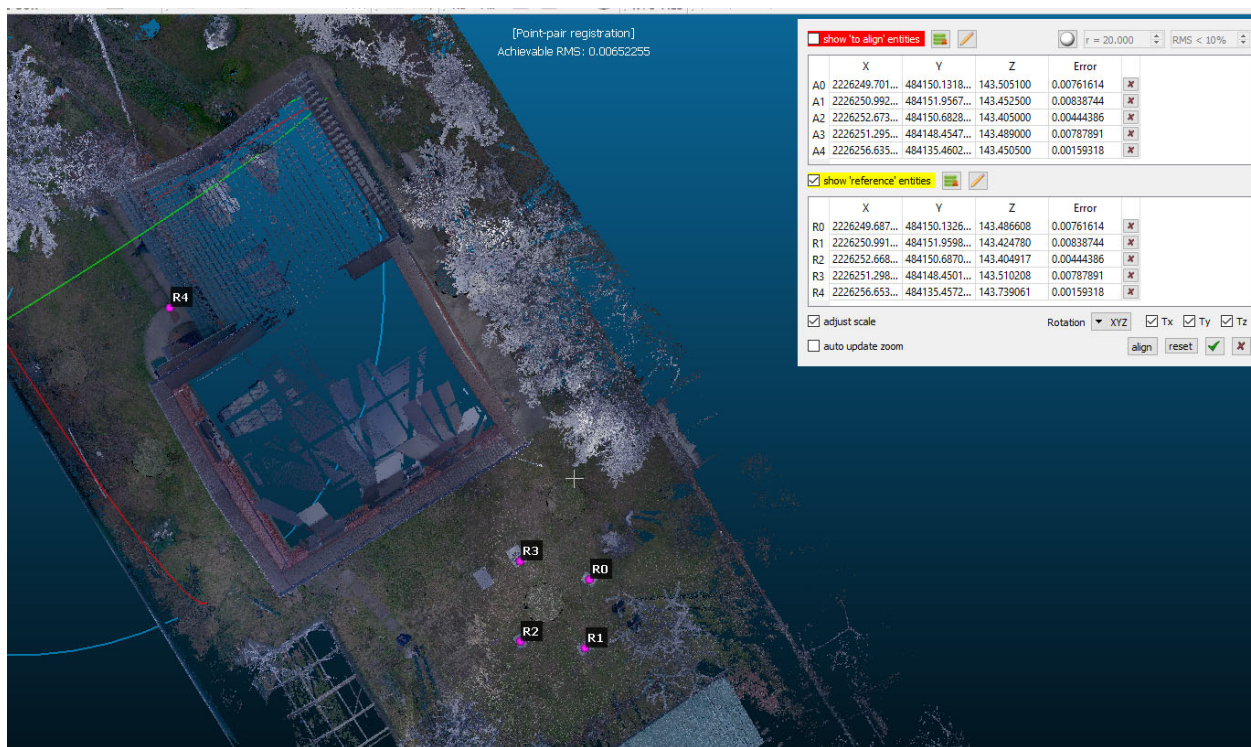


Рисунок 3.23 – Отождествление связующих опознаков и точек контуров на двух облаках

Результат объединения облаков, полученных из разных источников информации, по предлагаемой методике завершается оценкой точности отклонения одно-

именных точек на разных облаках и сопровождается матрицей трансформации, которая представлена на рисунке 3.24.

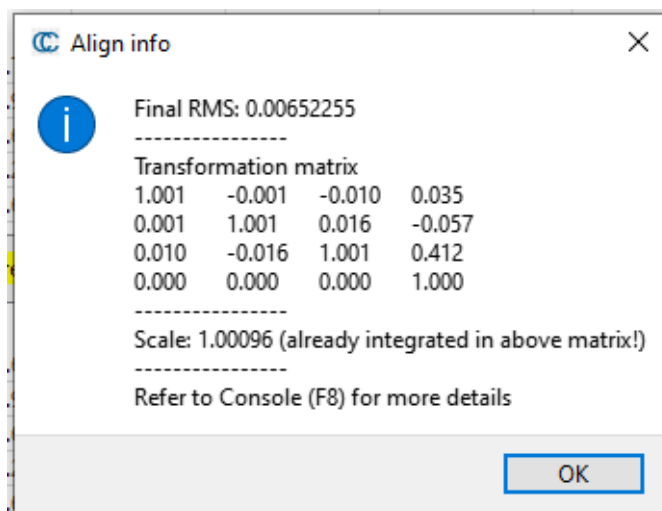


Рисунок 3.24 – Матрица трансформации облаков точек и СКО = 7 мм

Объединяем облака точек в единую точечную модель с сохранением привязки и выгружаем в формате .las для проведения промежуточной оценки точности объединенной точечной модели.

Оценку точности окончательного результата обработки полевых данных по предлагаемой методике моделирования урбанизированных пространств для задач 3D-кадастра и 3DLAS проведем по классической схеме. Выполним измерения по точечной модели в ПО Rescar PRO и сравним их с эталонными, сделанными в натуре с использованием лазерной рулетки. Результаты сравнения представлены в таблице 3.7, где за эталонные измерения приняты результаты измерений лазерной рулеткой с относительной ошибкой 1/3 000 и координаты границ участка, полученные из выписки из ЕГРН. Далее определена средняя квадратическая погрешность координат и геометрических размеров, полученных в результате моделирования по предлагаемой методике, данные представлены в таблице 3.8.

По координатам, снятым с точечной модели, произведено вычисление площади земельного участка, которая по данным выписки из ЕГРН составляет 806 м², а по данным модели 806,23 м², что характеризует предложенную методику и опи-

саные процедуры как удовлетворяющие точности текущей кадастровой системы РФ для земель населенных пунктов.

Таблица 3.7

Эталонные измерения			
№	Элемент	значение, м	
1	стена восточная ширина	7,282	
2	стена восточная высота до конька	8,875	
3	стена северная высота	6,579	
4	стена северная ширина	8,424	
5	высота оконного проема северная стена	1,465	
6	ширина оконного проема северная стена	2,072	
Из выписки ЕГРН			
7	координаты поворотных точек участка 1	2226262,25	484124,07
8	координаты поворотных точек участка 2	2226245,12	484123,61
9	координаты поворотных точек участка 3	2226262,19	484171,34
10	координаты поворотных точек участка 4	2226245,21	484170,82
Измерения по объединенному облаку			
1	стена восточная ширина	7,289	
2	стена восточная высота до конька	8,869	
3	стена северная высота	6,543	
4	стена северная ширина	8,438	
5	высота оконного проема северная стена	1,439	
6	ширина оконного проема северная стена	2,131	
7	координаты поворотных точек участка 1	2226262,256	484124,072
8	координаты поворотных точек участка 2	2226245,124	484123,600
9	координаты поворотных точек участка 3	2226262,195	484171,349
10	координаты поворотных точек участка 4	2226245,201	484170,824

Согласно описанному во втором разделе диссертационной работы, дальнейшее использование полученной точечной модели ОН возможно как для создания модели в формате CityGML, так и для информационного моделирования в формате IFC BIM. Процедура объединения гетерогенных облаков точек представлена на рисунке 3.25 в виде схемы.

На рисунке 3.26 приведена укрупненная схема всей предлагаемой методики кадастровых работ по моделированию ОН на урбанизированных территориях.

Таблица 3.8

№	Элемент	Отклонения		Среднее отклонение	Квадраты отклонений от среднего	Дисперсия	СКО, м
1	стена восточная ширина	0,007		0,0016	0,000029	0,0004	0,02
2	стена восточная высота до конька	-0,006			0,000036		
3	стена северная высота	-0,036			0,001296		
4	стена северная ширина	0,014			0,000196		
5	высота оконного проема северная стена	-0,026			0,000676		
6	ширина оконного проема северная стена	0,059			0,003481		
7	координаты поворотных точек участка 1	0,006	0,002		0,000036		
8	координаты поворотных точек участка 2	0,004	-0,010		0,000016		
9	координаты поворотных точек участка 3	0,005	0,009		0,000025		
10	координаты поворотных точек участка 4	-0,009	0,004		0,000081		

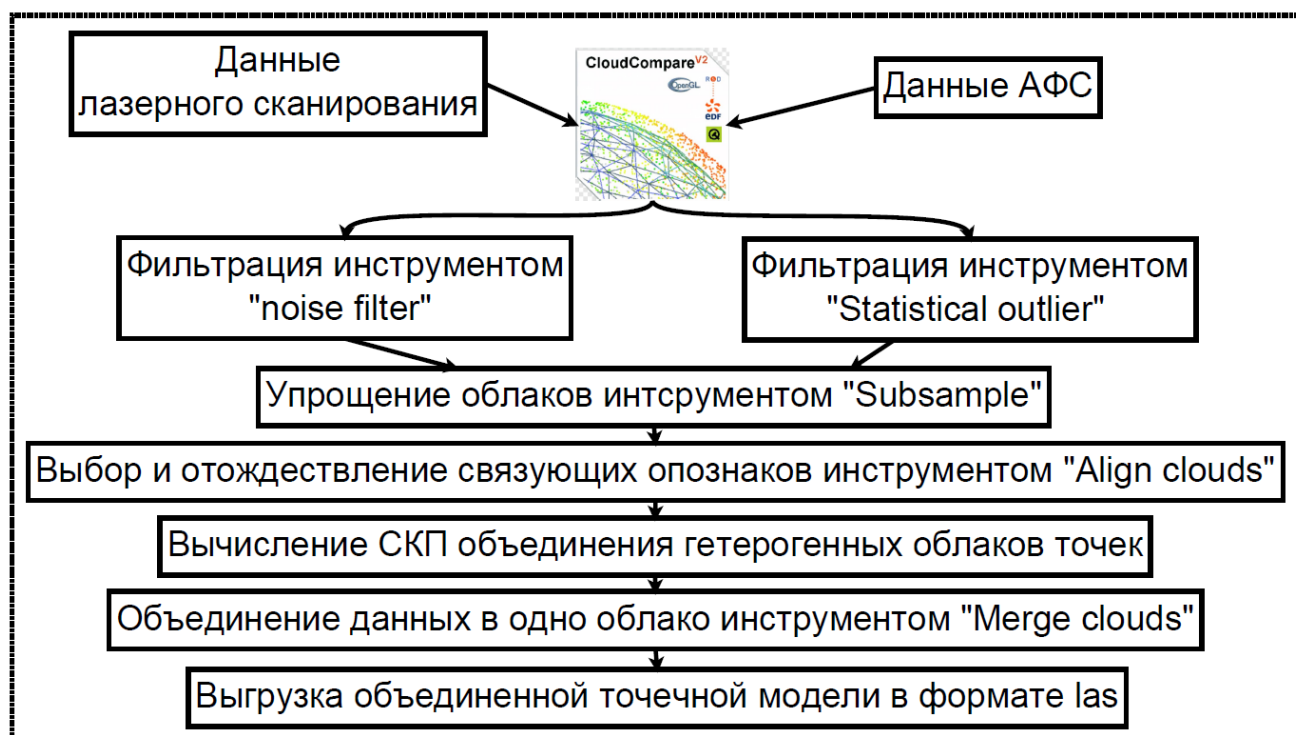


Рисунок 3.25 – Пошаговая схема реализации процедуры объединения гетерогенных облаков точек для моделирования ОН

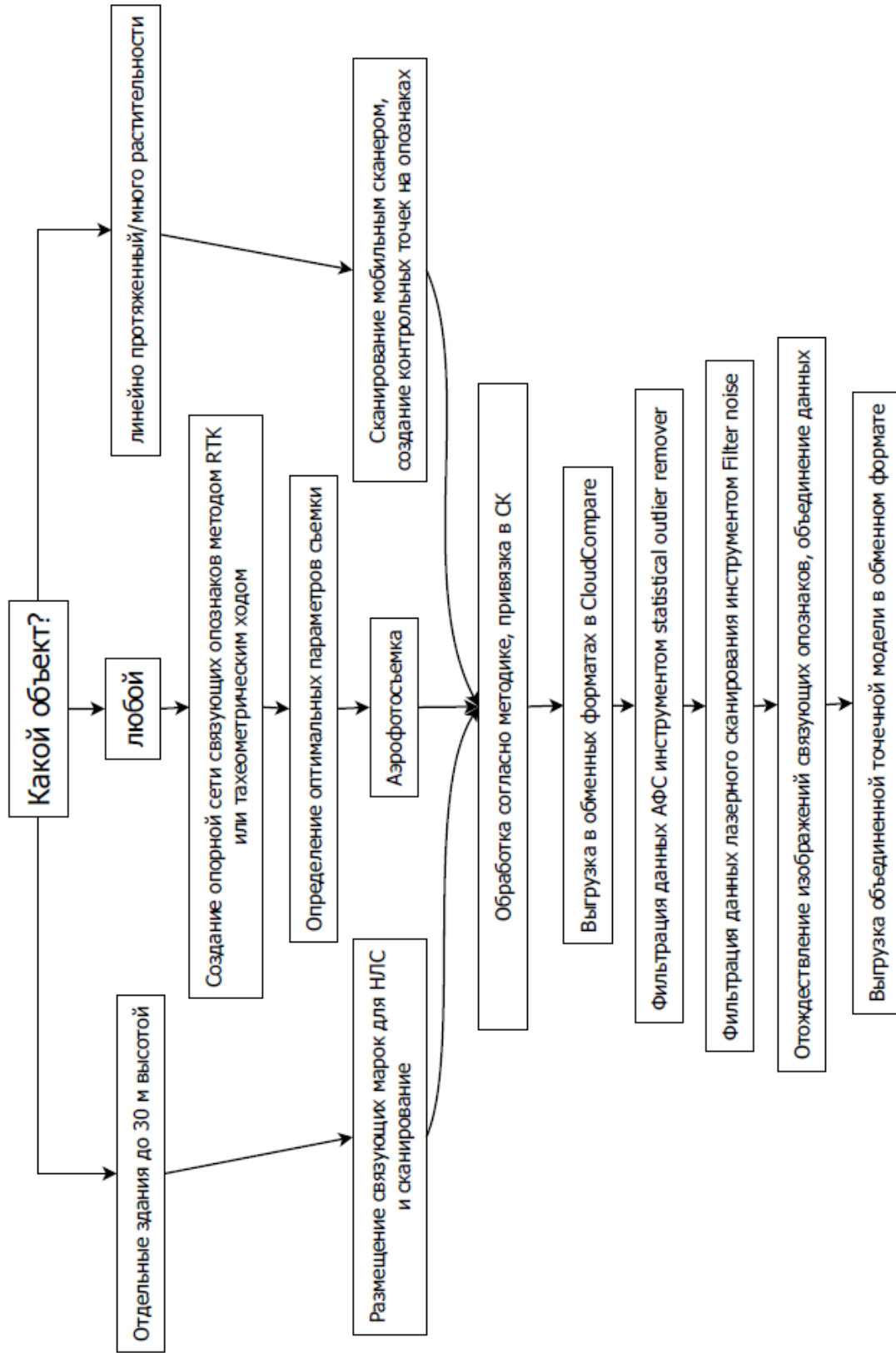


Рисунок 3.26 – Укрупненная схема предлагаемой методики кадастровых работ по моделированию ОН на урбанизированных территориях

3.3 Применение методики для сбора трехмерных кадастровых данных в парадигме «умного города»

Собранные пространственные данные с применением методики, описанной в предыдущем подразделе, могут быть использованы разными путями. Учитывая международную практику и принятый в РФ курс на развитие информационного моделирования в строительстве, продемонстрируем несколько вариантов извлечения кадастровых данных для целей 3D-кадастра, 3DLAS и «умного города».

Первый вариант использования полученных моделей – это создание так называемой нерегулярной триангуляционной сети (TIN модели) или Mesh для внедрения более подробной визуализации и наполнения городских ГИС на основе формата данных CityGML. Такие модели можно создавать автоматическими алгоритмами и получать гораздо более репрезентативную картину урбанизированных территорий. По таким данным легко можно проводить мониторинг целевого использования земельных ресурсов, отслеживать инфраструктурную доступность и обеспеченность инженерными коммуникациями, уточнять кадастровую оценку ОН, проектировать и планировать различные работы, а также управлять общей собственностью малоэтажных жилых комплексов.

В качестве демонстрации методики используем объект апробации, относимый автором к 3-й категории ОН, находящимся на территории СНТ с видом разрешенного использования индивидуальное жилищное строительство. Это участок площадью 6 038 м², расположенный под небольшим уклоном, с малоэтажной застройкой.

Построение таких моделей может быть выполнено также в ПО открытого кода CloudCompare с использованием плагина Poisson Reconstruction. Моделируемое облако содержит всего 56 млн точек.

Сначала вычисляем нормали по методу триангуляции и направляем их к барицентру массива, параметры представлены на рисунке 3.27. После чего, используя

встроенный плагин Poisson Reconstruction и параметры, представленные на рисунке 3.28, выполняем построение непосредственно Mesh.

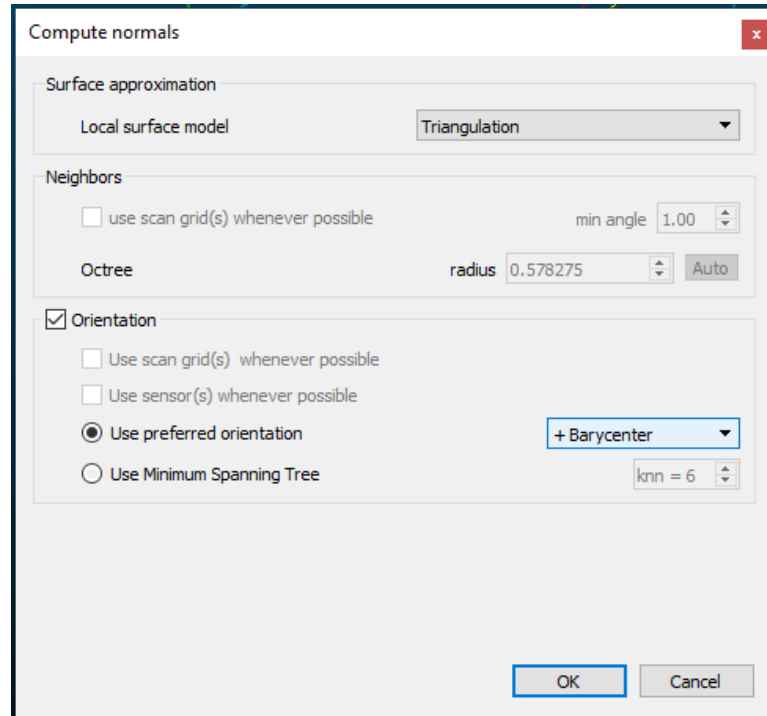


Рисунок 3.27 – Параметры вычисления нормалей

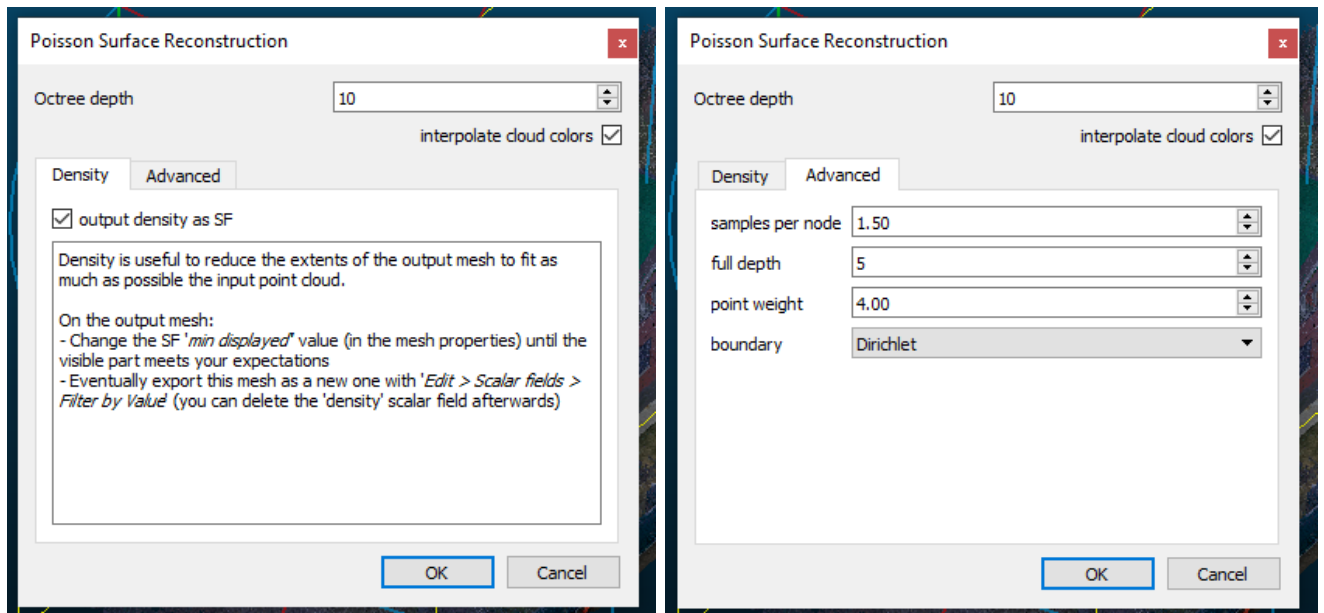


Рисунок 3.28 – Параметры построение Mesh

Обработка в общей сложности заняла не более 1 часа. Построенная полигональная модель (mesh), представленная на рисунке 3.29, соответствует уровню детализации LoD3 и может быть выгружена в среду Infracore или любую другую ГИС/САПР, которая поддерживает формат данных CityGML или IFC. Отдельно может быть получена элевационная модель всего ОН, представленная на рисунке 3.30.

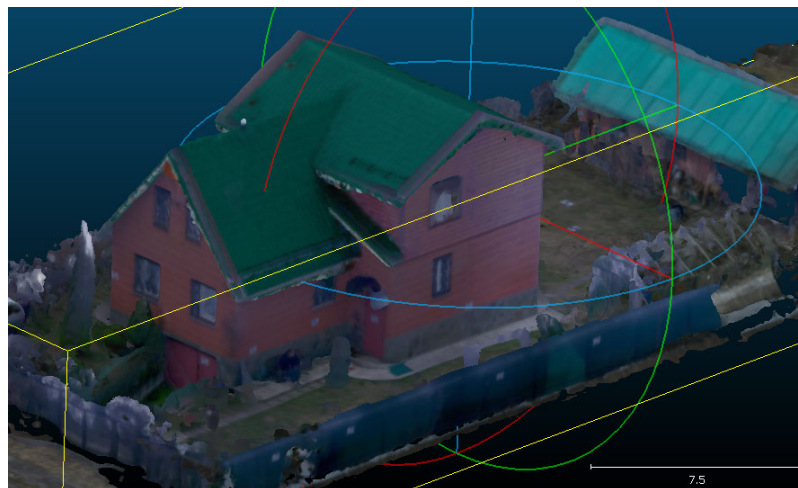


Рисунок 3.29 – Полигональная модель объекта апробации методики моделирования урбанизированных территорий

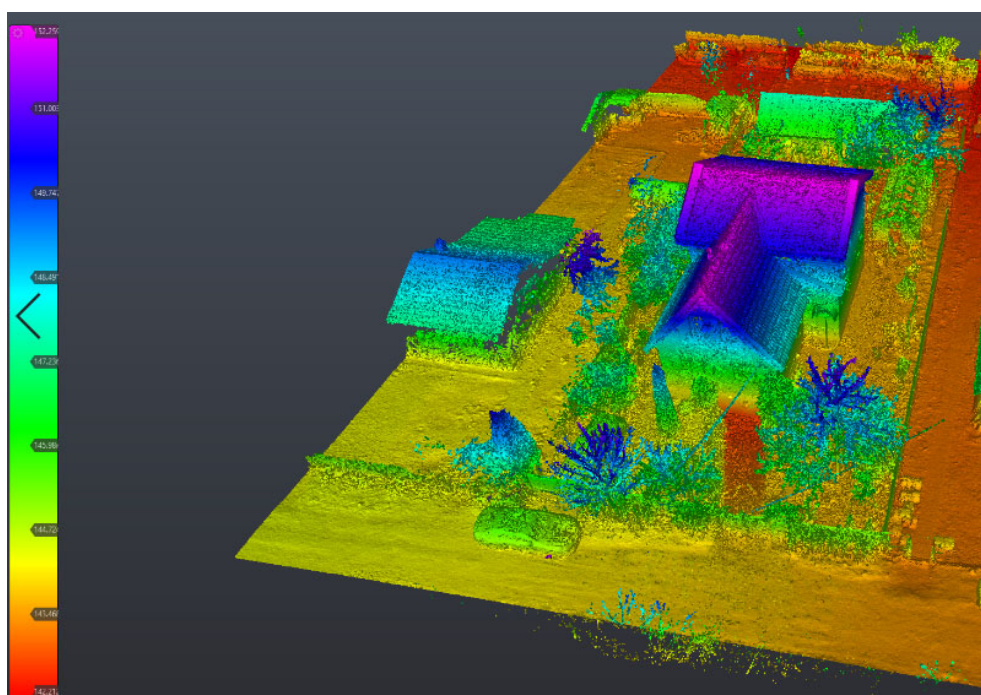


Рисунок 3.30 – Элевационная модель объекта апробации

Была проведена оценка точности модели, построенной автоматизированными способами, результаты которой представлены в таблицах 3.9 и 3.10.

Погрешность положения характерных точек ОН и ЗУ составила 5 см, что удовлетворяет точностным требованиям текущего законодательства в области кадастра в РФ для ОН, находящихся в черте населенных пунктов.

Таблица 3.9

Измерения по модели				
1	стена восточная ширина		7,269	
2	стена восточная высота до конька		8,866	
3	в. сев. стены		6,560	
4	ш. сев. стены		8,448	
5	в. оконного проема сев. стена		1,398	
6	ш. оконного проема сев. стена		2,146	
7	координата 1		2226262,207	484124,145
8	координата 2		2226245,210	484123,585
9	координата 3		2226262,208	484171,363
10	координата 4		2226245,113	484170,784

Таблица 3.10

Оценка точности						
№ элемента	Отклонения		Среднее отклонение	Квадраты отклонений от среднего	Дисперсия	СКО, м
1	-0,013000		-0,0011	0,000141	0,0026	0,05
2	-0,009000			0,000081		
3	-0,019000			0,000361		
4	0,024000			0,000576		
5	-0,067000			0,004489		
6	0,074000			0,005476		
7	-0,049	0,073		0,002401		
8	0,086	-0,015		0,007396		
9	0,013	0,014		0,000169		
10	-0,088	-0,040		0,007744		
			0,005497			
			0,000225			
			0,000196			
			0,001600			

Применение полученной модели в парадигме «умного города» возможно через внедрение в земельно-информационные системы на основе формата пространственных данных CityGML. Следовательно, все задачи пространственного анализа и проектирования, выполняемые с использованием ГИС-инструментария, могут быть улучшены за счет использования более детального и актуального пространственного базиса в виде трехмерных моделей объектов недвижимости, полученных в результате применения вышеописанной методики.

Для демонстрации этой возможности загрузим полученную модель Mesh рассмотренного объекта апробации в среду Infracore, результат показан на рисунке 3.31. С помощью встроенных алгоритмов по космическим снимкам была построена грубая пространственная модель среды в системе координат МСК 50, зона 2, а затем в нее была подгружена полигональная модель, представляющая детализированную (LoD3) часть урбанизированного пространства. Таким образом, показана результативность предложенной методики для моделирования пространства под стандарт CityGML, на основе облака точек, полученного из данных АФС и НЛС.

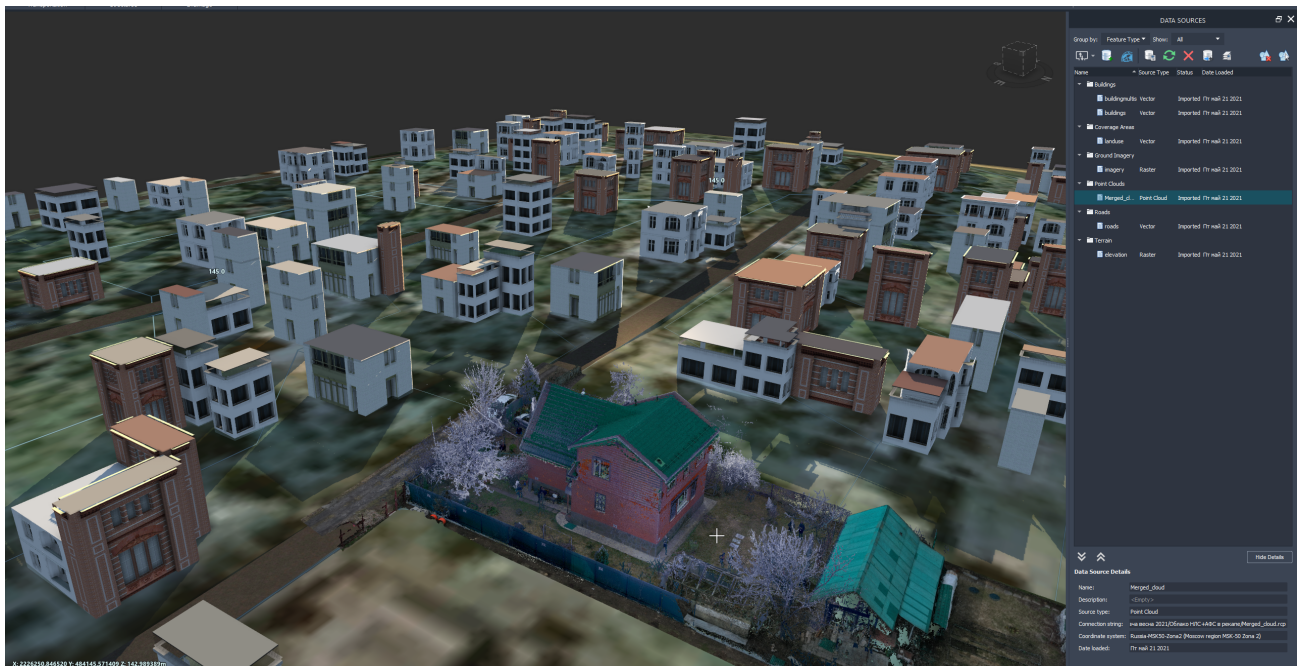


Рисунок 3.31 – Отображение объекта апробации в среде Infracore, поддерживающей формат CityGML

Отличительной особенностью использования таких «умных» ЗИС станет соответствие трем параметрам:

- 1) высокая интероперабельность – взаимодействие и обмен данными с другими системами;
- 2) широкий инструментарий мониторинга – измерение и контроль состояния среды и автоматизированная адаптация к ее изменениям;
- 3) предиктивность – возможность строить модели развития и предлагать оптимальные варианты решения управленческих задач.

На фоне развития таких государственных сервисов, как Гособлако, и создания Единой государственной картографической основы, которые войдут в экосистему будущего единого информационного ресурса о земле и недвижимости (ФГИС ЕИР), описанные результаты должны способствовать развитию сферы трехмерных реестров объектов недвижимости и цифровизации государственного и муниципального управления урбанизированными территориями.

Следующим этапом диссертационного исследования стало применение апробированной методики на объекте в черте города с целью создания модели в формате IFC. Согласно предложенному в разделе 2 этой работы определению второй категории ОН, подлежащих моделированию, был выбран объект, имеющий меньшее значение для городских инфраструктурных сетей, чем объекты первой категории, но обладающий общественным статусом и большим человеко-поток. В качестве такого объекта использовалось здание главного корпуса Государственного университета по землеустройству, расположенного по адресу: Москва, ул. Казакова, 15. Определенные оптимальные параметры АФС по предложенной методике отражены на рисунке 3.32. Для съемки использовался БПЛА DJI Mavic Pro, параметры камеры представлены на рисунке 3.33, высота полета рассчитывалась по формуле (3.2), продольное и поперечное перекрытие не менее 80 %, GSD назначено равным 2 см.

На объекте было выполнено АФС и сканирование внешних стен зданий, а также выполнено сканирование внутри объекта на уровне первого этажа. По дан-

ным сканирования и аэрофотосъемки было построено объединенное плотное облако точек, содержащее порядка 200 миллионов точек, представленное на рисунке 3.34, внутренний скан представлен на рисунке 3.35.

Подобранные параметры АФС	
ISO	100
Диафрагма	2,2
Выдержка	1/100
автофокус	
Нсъемки	60 м
GSD	2 см
Vполета	3 м/с
Запись в RAW и JPEG max	

Рисунок 3.32 – Оптимальные параметры АФС

Модель камеры	Разрешение	Фокусное р-е	Размер пикселя
FC220 (4.73mm)	4000 x 3000	4.73 мм	1.57 x 1.57 мкм

Рисунок 3.33 – Характеристики камеры БПЛА DJI Mavic Pro

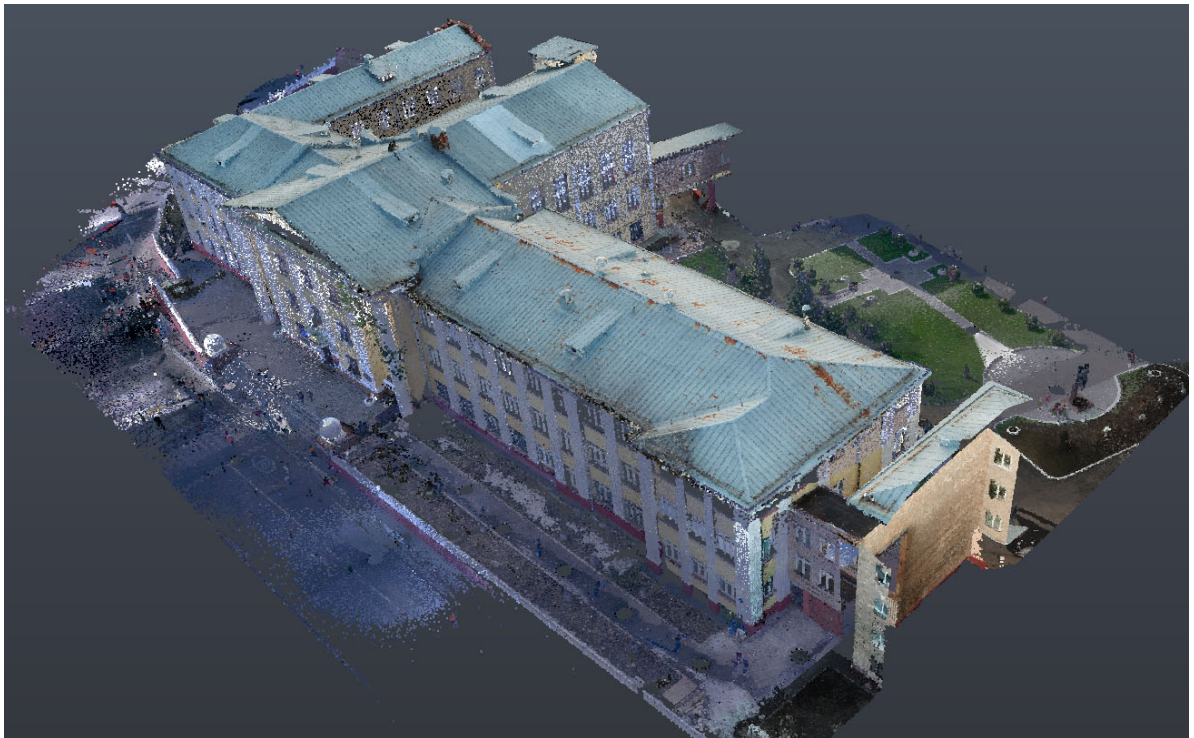


Рисунок 3.34 – Точечная модель главного здания ГУЗ



Рисунок 3.35 – Фрагмент точечной модели внутренней части главного здания ГУЗ, левое крыло, коридор

Объединенная точечная модель была обработана в автоматизированном режиме в ПО CloudCompare и получен mesh, представленный на рисунке 3.36. По описанной ранее методике он может быть выгружен в ГИС или САПР ПО для дальнейшего пространственного анализа территории ОН.

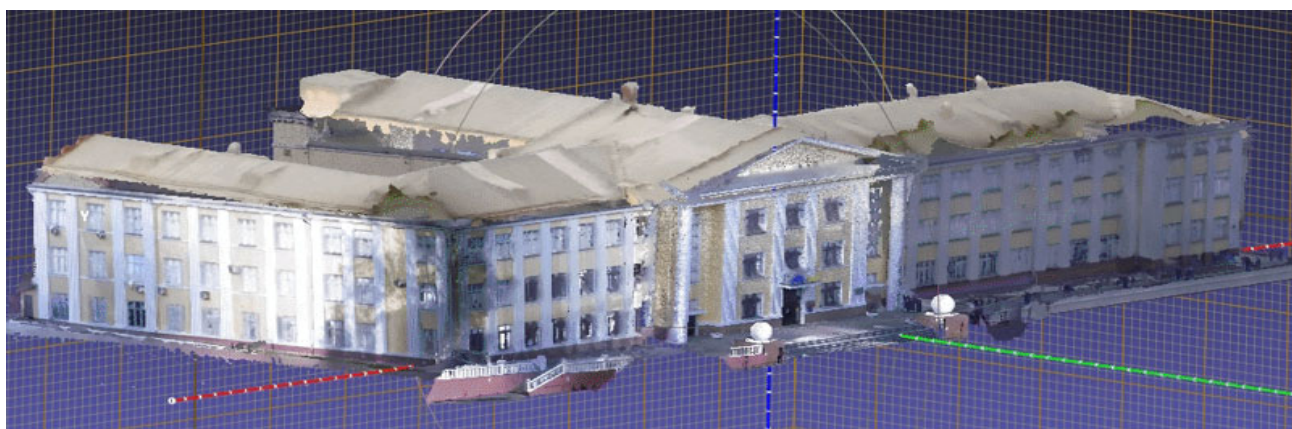


Рисунок 3.36 – Mesh главного здания ГУЗ

Так как методика прошла апробацию в ситуации, когда необходимо представить объект без значительной инфраструктурной нагрузки успешно, следующей целью является твердотельное моделирование под формат IFC по облаку точек. Для этого точечная модель в формате .las была загружена в ПО Rescap Pro, сохранена в формате .rsc и подгружена как внешняя ссылка в ПО для архитектурного и BIM-проектирования Revit (рисунок 3.37).



Рисунок 3.37 – Фрагмент твердотельной модели ГУЗ в Revit на уровне детализации LoD3 в формате IFC

Создание твердотельной модели по данным точечной модели занимает большее время, чем создание Mesh, при этом результат является гораздо более подробным благодаря атрибутивным данным и применяемым семантически отягощённым примитивам. Вместе с тем, раскрывается потенциал для глубокого внутриобъектного анализа и мониторинга [28]. Разумеется, затраты на такое моделирование оправданы только в случаях, когда сами объекты представляют собой сложный инфраструктурный комплекс, или имеет определяющее значение их конструктивное или инженерное устройство, которое нельзя отобразить средствами CityGML. Кон-

кратная разница и обзор подобных ситуаций были рассмотрены в разделе 2 данной диссертационной работы.

Выполненная оценка точности построенной модели с использованием натуральных измерений лазерной рулеткой представлена в таблице 3.11.

Вычисленное СКО = 0,04 м удовлетворяет требованиям к точности системы государственного учета объектов недвижимости и регистрации прав на объекты, расположенные в черте населенных пунктов. Эти контрольные промеры выполнены с целью определения геометрических отклонений в результате построения 3D-модели по предлагаемой методике сбора пространственных данных.

Таблица 3.11

№	Описание измеренного элемента ОКС	Натурные измерения, м	Измерения по модели, м	Разности, м	Дисперсия	СКО, м
1	Высота колонны	14,281	14,307	0,026	0,0014	0,04
2	Длина ступеньки	2,390	2,406	0,016		
3	Расстояние от шара до шара	22,219	22,147	-0,072		
4	Глубина оконного проема	0,226	0,215	-0,011		
			Средняя разность	-0,010		

На данном этапе развития ЕГРН и правовой рамки в отношении точности представления трехмерных моделей в кадастре автор руководствуется действующими требованиями к точности планового положения характерных точек ОН и считает необходимым предъявлять равноточные требования ко всем трем измерениям (X , Y , H).

После завершения создания твердотельной модели в ПО Revit ее можно также в формате IFC выгрузить в среду Infracore на общую генерализованную картографическую подложку или в любой другой софт, поддерживающий IFC.

Представленный пример наглядно демонстрирует валидность разработанных рекомендаций по сбору пространственных данных для моделирования ОН под формат IFC, который соответствует строительным форматам информационного моде-

лирования зданий. Можно заключить, что предлагаемая методика сбора пространственных данных удовлетворяет оба подхода к моделированию урбанизированных территорий в будущей трехмерной системе кадастра в Российской Федерации. Получившуюся твердотельную модель можно включать в ЗИС и в строительные информационные системы. Такая модель соответствует уровню детализации LoD4 в терминологии LADM, ей предлагается назначить уровень проработки модели K2 в терминологии СП 333.1325800.2020.

По такой модели возможно выполнять трехмерную техническую инвентаризацию, создание технических планов, поэтажных планов ОКС, мониторинг деформации несущих конструкций и устаревания фасадов, расчет уровня инсоляции и теплоотдачи, а как следствие – вычисление оптимального уровня потребления тепла и электроэнергии. Вычисление таких показателей для каждого объекта достаточно проводить единожды и уточнять после каждой реконструкции. Экономическая и управленческая значимость выражается в возможности провести конкретизированную оценку эффективности расходования энергетических ресурсов отдельного объекта или ряда объектов, вплоть до целого района населенного пункта, что способствует оптимизации проектов реконструкции и модернизации за счет средств города. Таким образом с использованием данных трехмерного кадастра ОН возможно достижение более экологичного распределения ресурсов и эффективного управления урбанизированными территориями.

Обращая внимание на одно из направлений, выделенных в качестве основных на повестке ООН до 2030 года и описанных в разделе 1 этого диссертационного исследования, был проведен эксперимент по применению разработанной методики сбора пространственных данных для моделирования объекта, относимого автором к третьей категории ОН. Объект – лесопарковая территория, расположен по адресу г. Мытищи, дендропарк МГТУ имени Баумана также подразумевает использование модели для лесочетных работ и моделирования зеленых насаждений в рекреационных целях.

Сущность эксперимента заключалась в сборе трехмерных пространственных данных для определения таксационных характеристик деревьев выдела (высота ствола, форма и размер кроны, сбег ствола, наличие тропиной сети, состояние подлеска), для проведения инвентаризации зеленых насаждений в рамках лесоучетных работ. Также на территории дендросада проводились плановые работы по спилу модельных деревьев, которые выбирают в качестве типичного образца, характеризующего насаждения или его части. Актуальность данного эксперимента связана с тем, что объект имеет экологическую значимость для городской территории, а проводимые лесоучетные работы являются информационной основой управления лесами и лесопарковыми зонами, входящими в состав лесного хозяйства РФ. Без новых инновационных информационных технологий, в том числе пространственного сбора и анализа данных, с использованием современных программ, технических и коммуникационных средств с учетом мирового опыта развитие лесного фонда РФ невозможно [78, 34, 13, 44].

На территории участка до спила модельных деревьев были размещены связующие опознаки и выполнено сканирование с использованием прибора GeoSLAM ZEB-HORIZON 3D Mobile Scanner. Согласно методике были подобраны оптимальные параметры АФС и выполнена съемка с аппарата Phantom 4 Advanced, параметры камеры представлены на рисунке 3.38. Определенные оптимальные параметры АФС по предложенной методике представлены на рисунке 3.39. Работы проводились в этом случае без привязки к абсолютной системе координат.

Модель камеры	Разрешение	Фокусное р-е	Размер пикселя
1" CMOS (24.00 mm)	5472 x 3648	24.00 мм	2.41 x 2.41 мкм

Рисунок 3.38 – Характеристики камеры БПЛА DJI Phantom 4 Advanced

Первый этап подразумевал выполнение АФС с проекцией пикселя на местность (GSD), равной 2 см, высота полета 200 метров. Выбор GSD в данном случае связан в первую очередь со сложностями в обработке материалов АФС лесных мас-

сивов при более крупном разрешении. Предлагаемые связующие опознаки использовались как характерные точки для связки лазерного сканирования и АФС. Было получено 256 снимков, отбраковано два по причине смаза изображения. Обработка материалов АФС производилась в цифровой фотограмметрической системе Agisoft Metashape. Плотное облако точек было построено на рекомендованных выше настройках и выгружено в формате .las, представлено на рисунке 3.40.

Подобранные параметры АФС	
ISO	100
Диафрагма	8
Выдержка	1/240
автофокус	
Нсъемки	200 м
GSD	2 см
Уполета	5 м/с
Запись в RAW и JPEG max	

Рисунок 3.39 – Оптимальные параметры АФС по предложенной методике

Для сканирования прибором GeoSLAM были выбраны параметры рабочей дистанции 2 м от носителя и до 45 м до объекта, таким образом задавался диапазон, в котором регистрируемые отражения запоминались прибором.

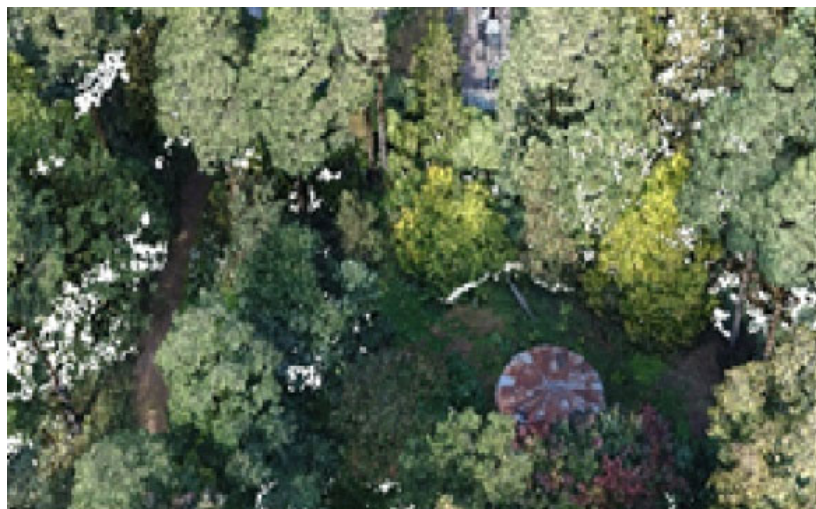


Рисунок 3.40 – Результат фотограмметрической обработки аэрофотосъемки с применением БАС в виде плотного облака точек

Построение и обработка плотного облака точек выполнялось в ПО GeoSLAMHub, после обработки выгружалось в формате .las.

Согласно методике, последний этап подразумевал использование ПО открытого кода CloudCompare для объединения двух облаков точек по связующим опознакам. Результатом объединения облаков стала точечная модель, пригодная для определения параметров деревьев и лесопарковой территории. Погрешность объединения исходных облаков точек составила 0,07 м. Результат объединения представлен в виде плотного облака точек на рисунке 3.41 в формате .las.

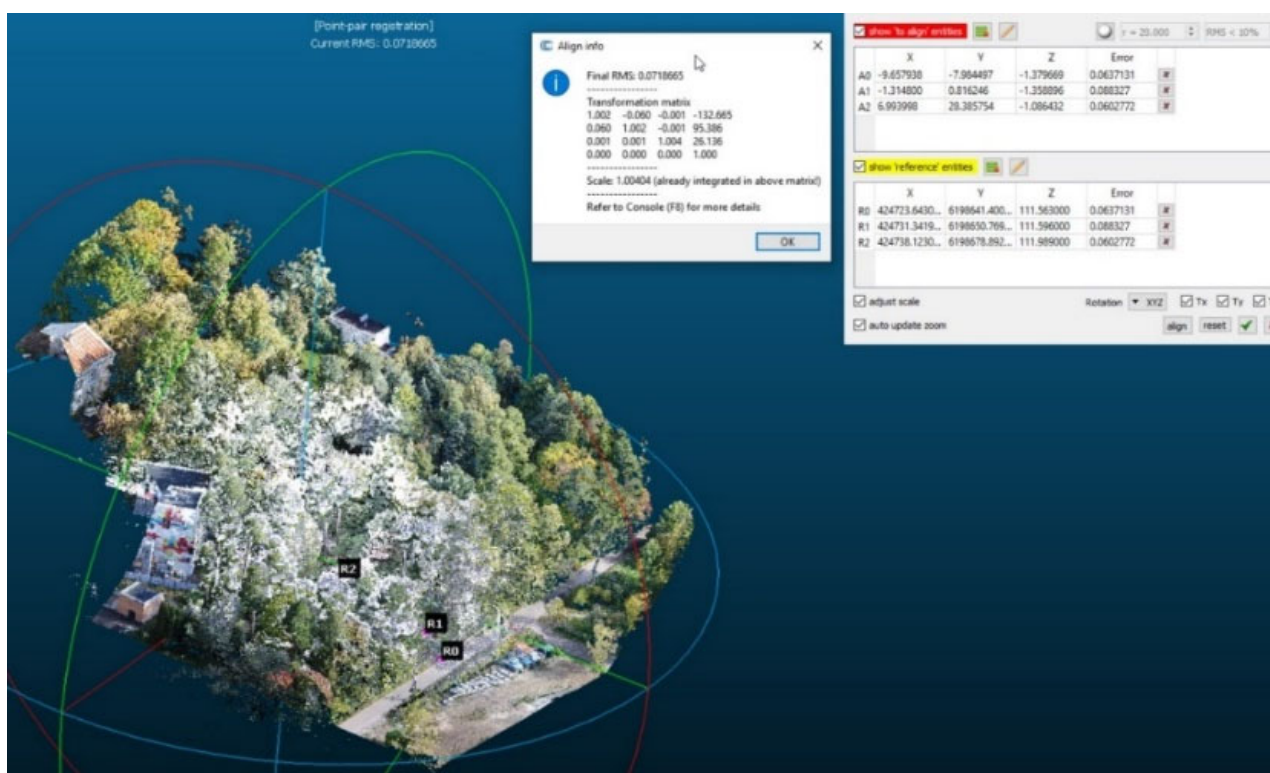


Рисунок 3.41 – Общий вид полученной точечной модели и отчет по СКП

Преимущество применения предлагаемой методики для сбора пространственных данных на ОН, относимых к третьей категории, наглядно представлено на рисунке 3.42. Такая трехмерная модель может быть использована как в ЗИС населенных пунктов, так и в специализированных лесных информационных системах (например 3D Forest) для учета, анализа и мониторинга лесных насаждений и рекреационных территорий в черте населенного пункта. По представленным данным

для целей 3D-кадастра и эффективного управления урбанизированными территориями можно определять следующие характеристики:

- видовой состав насаждений;
- диаметры ствола на любой высоте, без валки дерева;
- высоту деревьев;
- площадь проекции кроны;
- вертикальную и горизонтальную протяженность кроны;
- наличие пороков и повреждений древесины вредителями;
- протяженность бессучковой части ствола [126].

По этим же данным возможно построение цифровой модели рельефа, выполнение зонирования тропиной сети, объектов рекреационной инфраструктуры и других функциональных зон.

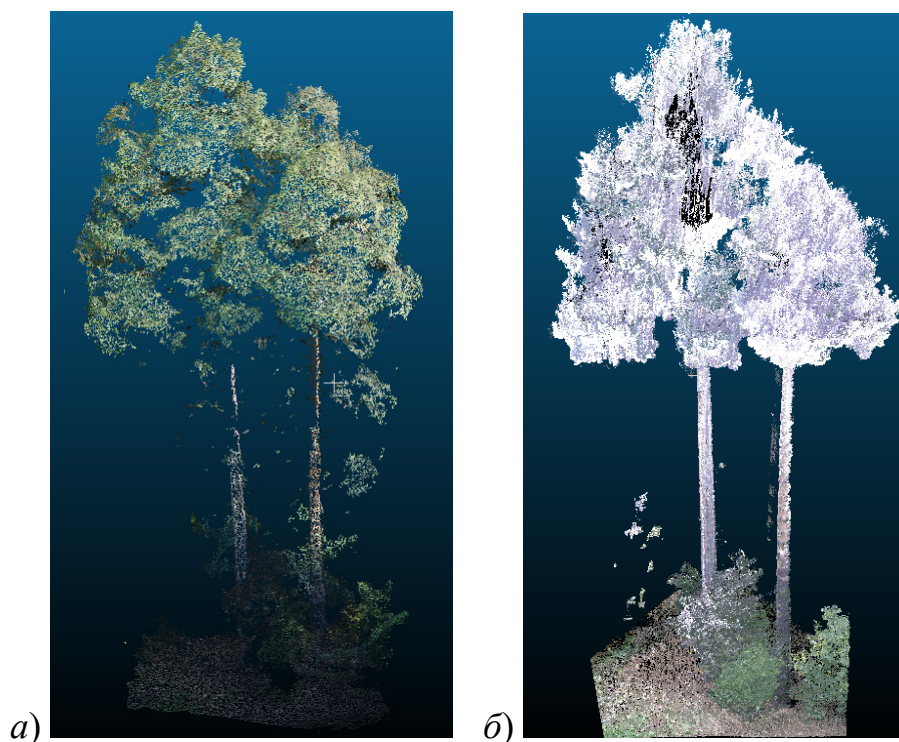


Рисунок 3.42 – Модели дерева по данным АФС (а) и по данным АФС и НЛС (б)

Для осуществления валидации полученных данных с использованием описанной методики была выполнена оценка точности в соответствии с нормативами

и стандартами, принятыми в лесном хозяйстве. Сущность определения параметров сбег ствола представлена на рисунке 3.43.

Именно в соответствии с процедурой валидации по модельным деревьям применяется ГОСТ Р50779.82–2018 (ИСО 28594:2017) «Статистические методы. Комбинированные системы нуль-приемки и процедуры управления процессом при приемке продукции», где приведены процедуры планирования и проведения выборочного контроля для оценки качества и проверки соответствия продукции установленным требованиям. Применение статистического приемочного контроля обеспечивает оптимальный баланс между риском получения недостоверных результатов контроля и затратами на его проведение. Высокая эффективность от внедрения данной методологии отмечается в условиях производства, однако ее внедрение обосновано во всех ситуациях, где требуется определение объема выборки при принятии решения о соответствии объекта установленным требованиям, например, при принятии решения о соответствии параметров модельных деревьев установленным требованиям [42].

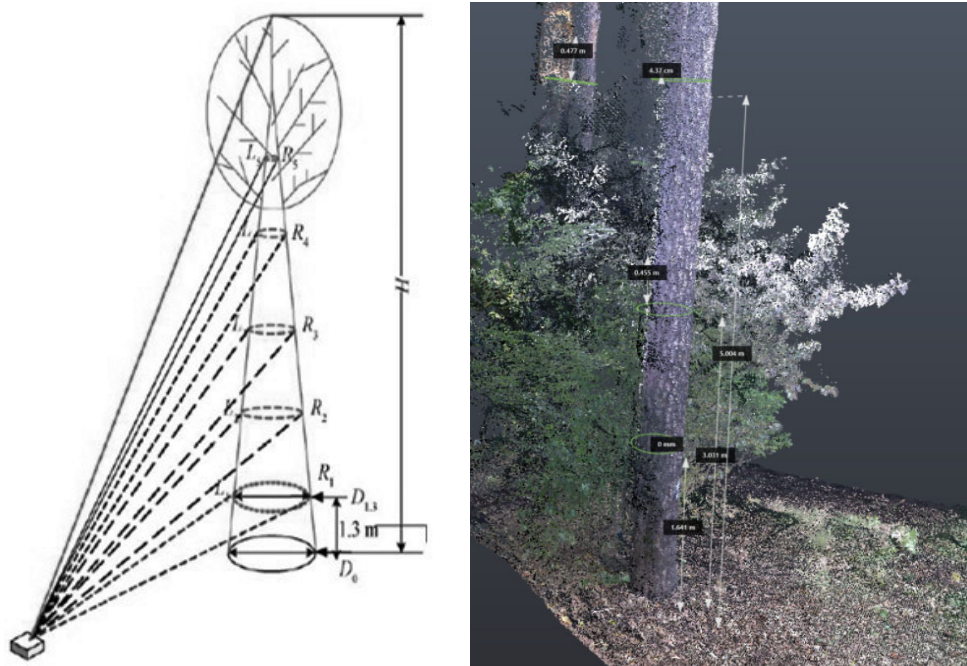


Рисунок 3.43 – Суть определения параметров дерева на основе полученных данных

План выборочного контроля в соответствии с ГОСТ Р 50779.82–2018 рекомендуется выбирать, исходя из следующих критериев:

- уровня верификации, характеризующего значимость последствий от получения недостоверных результатов контроля;
- типа характеристики качества (альтернативный или количественный);
- типа выборочного контроля (одноступенчатый или непрерывный);
- кода объема выборки;
- жесткости контроля (нормальный, усиленный, ослабленный).

В соответствии с ГОСТ Р 50779.82–2018 в случае нормального контроля план выборочного одноступенчатого контроля по количественному признаку модельных деревьев предусматривает объем выборки $n = 4$ исходя из следующей исходной информации: минимальный уровень верификации, $VL = 1$, выбор которого обусловлен низкой значимостью последствий от получения недостоверных результатов контроля, код объема выборки – А – определен на основании объема партии и уровня верификации. Также применение ГОСТ Р 50779.82–2018 обеспечит принятие решения с заданной вероятностью о соответствии результатов измерений параметров модельных деревьев установленным требованиям.

Валидация, проводимая по описанному стандарту, призвана устранить частую практическую погрешность, возникающую при определении таких критических параметров, как диаметры ствола на разных высотах, и непосредственно высота самого дерева. Верификации получаемых данных осложняется тем, что в процессе натурального контрольного определения диаметров стволов специалисты лесного сектора используют мерные вилки (погрешность измерения менее 1 см), а высоту деревьев измеряют высотомерами (погрешность измерения до 1 м даже в благоприятных условиях). Поэтому после сбора пространственных данных на объекте апробации и спила модельных деревьев были выполнены измерения высоты и диаметров пяти поваленных стволов лазерной рулеткой и мерной вилкой соответственно. Полученная СКП составила 0,51 см, вычисления представлены в таблице 3.12, что удовлетворяет точности при постановке на кадастровый учет земель лесного фонда

согласно [58], а также позволяет с гораздо большей точностью и достоверностью производить пространственный анализ и определение таксационных характеристик при проведении инвентаризации зеленых насаждений, что позитивно скажется на всей системе лесного хозяйства и уровне экологической и пожарной безопасности в лесопарковых и рекреационных зонах в черте населенных пунктов, а также станет дополнительным стимулом к внедрению трехмерных систем управления земельными ресурсами в области лесного хозяйства страны, так как полученные данные могут быть представлены в формате точечной модели в ЗИС.

Таблица 3.12

№	Измерения эталонные				
	Высота, м	Диаметр С-Ю, см	Диаметр З-В, см		
1	25,95	52,5	51,4		
2	23,25	50,5	59,5		
3	25,75	51,0	49,1		
4	25,15	45,3	46,6		
5	22,35	39,8	41,5		
№	Измерения по модели				
	Высота, м	Диаметр С-Ю, см	Диаметр З-В, см		
1	25,02	52,7	51,7		
2	23,98	50,2	59,1		
3	26,4	50,7	48,7		
4	25,00	45,2	47,4		
5	21,47	40,0	41,5		
№	Отклонения	Среднее отклонение	Квадраты отклонений от среднего	Дисперсия	СКП, м
1	-0,93	-0,038	0,7956	0,257	0,51
2	0,73		0,5329		
3	0,65		0,4225		
4	-0,15		0,0225		
5	-0,88		0,7744		
6	0,20		0,0400		
7	-0,29		0,0841		
8	-0,30		0,0900		
9	-0,10		0,0100		
10	0,20		0,0400		
11	0,30		0,0900		
12	-0,40		0,1600		
13	-0,40		0,1600		
14	0,80		0,6400		
15	0,00		0,0000		

В дополнение полученные в виде плотных облаков точек образы деревьев могут быть использованы для формирования банка данных автоматизированной классификации, что позволит в автоматическом режиме определять состав насаждений. Трехмерная модель насаждения востребована в ландшафтном дизайне; также она может быть применена в лесопарковом хозяйстве для определения существующего и моделирования проектируемого типа пространственной структуры и отвода деревьев в ландшафтную рубку. Имея серию подобных сцен, снятых на модельном участке с интервалом в несколько лет, можно проводить мониторинг изменения пространственной структуры насаждения.

Исследование созданной сцены показало, что для измерения характеристик деревьев, таких как высота и диаметр, можно использовать встроенные средства и утилиты ПО открытого кода например 3D Forest, а значит возможна интеграция таких инструментов в городские ЗИС и налаживание интероперабельности.

Этот инструментарий позволяет, не прибегая к рубке модельных деревьев, измерять диаметры ствола на разных высотах, а следовательно, определять для большого числа деревьев коэффициент формы ствола, видовое число и величину сбег, что сильно сокращает потребность в полевых работах, а значит и экономические затраты. Данные параметры будут востребованы для составления региональных таблиц сбег и найдут применение при проверке точности рабочих методов учета заготовленной древесины. Детальная информация о форме, размерах и форме крон деревьев представляет большой интерес для специалистов по тематической обработке гиперспектральных данных высокого разрешения.

Эти параметры влияют на показатель дисперсии объекта, представляющий собой угловое распределение интенсивности рассеянной составляющей оптического или электромагнитного излучения. Оно зависит от размера, геометрической формы рассеивателя и относительного показателя преломления.

Это создает возможность формировать достоверную выборку для обучения и более точно настраивать алгоритмы компьютерной обработки данных дистанционного зондирования лесных массивов, таким образом повышая эффективность

пространственного анализа и оптимальность предиктивных моделей использования земельных ресурсов [113].

Итоги исследований инструментов и подходов к обработке результатов сбора пространственных данных дают возможность представить рекомендации по обработке таких данных для задач моделирования ОН для 3D-кадастра и представлены на рисунке 3.44.

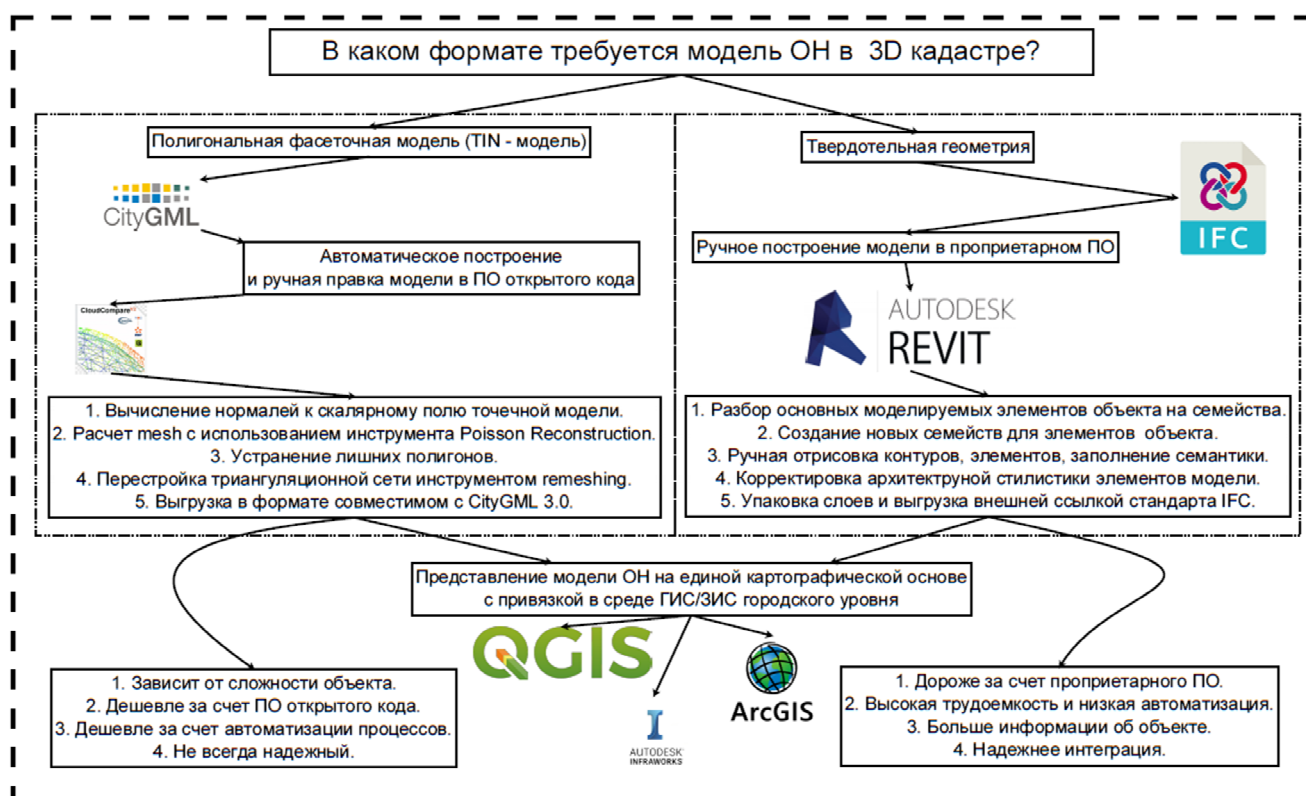


Рисунок 3.44 – Блок-схема методики моделирования ОН для задач 3D-кадастра и эффективного управления урбанизированными территориями

Резюмируя опыт проведенных исследований и экспериментов, сформулируем итоговую технологическую цепочку методики сбора пространственных данных для моделирования урбанизированных территорий в целях 3D-кадастра и «умного города».

В первую очередь, необходимо определить, какой объект требуется моделировать, – для этого автором предложена категоризация ОН для 3D-кадастра. Учитывая категорию объекта, необходимо выбрать стандарт представления данных – CityGML или IFC. Далее, учитывая выбранный стандарт, необходимо провести процедуру определения оптимальных параметров АФС для выбранного БПЛА и, руководствуясь приведенными формулами и опытом, выбирают оптимальные параметры НЛС или МЛС, размещают рекомендуемые связующие опознаки, марки для связи станций НЛС и координируют их. После этого выполняют АФС и сканирование объекта с заданными параметрами, обрабатывают результаты по предлагаемой в этой диссертационной работе методике. Полученная модель является соответствующей одному из принятых в международной практике стандарту представления данных в трехмерных кадастровых системах, отвечающей точностным требованиям к положению характерных точек ОН, а также пригодной для включения в экосистему городских ГИС/ЗИС. Описанная методика для наглядности представлена на блок-схеме в приложении А.

Проводя экономическую оценку распределения издержек на реализацию предлагаемой методики, можно выделить следующие моменты.

1 Приборы, рассмотренные в диссертационной работе, являются наиболее доступными из всего представленного ассортимента, а сами технологии будут с каждым годом все доступнее.

2 То же самое касается камер, устанавливаемых на БПЛА.

3 В методике предлагается использовать часть ПО открытого кода, что сильно сокращает издержки на обработку и открывает возможность адаптации инструментария под отечественные нужды.

4 Итоговая стоимость работы будет больше зависеть от самого объекта и уровня детализации требуемой модели.

5 Для государства выгода от применения предлагаемой методики будет значительно увеличиваться при повторном многоцелевом использовании данных – это одна из новых задач кадастра как банка разнородных данных.

6 Повсеместное внедрение международных стандартов и трансформация кадастровой системы к трехмерному виду подстегнет развитие и удешевление всех компонентов, задействованных в предлагаемой методике.

Выводы по третьему разделу

Сформулированные в начале раздела задачи по исследованию и разработке методов сбора пространственной информации с использованием АФС и НЛС решены путем теоретических изысканий и практических экспериментов, с последующей апробацией на трех разных объектах.

Предложена геодезическая методика определения оптимальных параметров АФС для задач 3D-кадастра, и составлены рекомендации по проведению и обработке данных НЛС и МЛС, а также геодезического обоснования для сбора таких данных на урбанизированных территориях.

Получены три отдельные модели объектов недвижимости для второй и третьей категории, которые представлены в форматах CityGML и IFC, что соответствует международной практике и, как было показано во втором разделе, соответствует заданному на данный момент вектору развития кадастровой системы и системы управления земельными ресурсами в парадигме «умного города» в Российской Федерации.

Выполнена оценка точности всех трех моделей, погрешности которых не превысили нормативную точность, что свидетельствует о соответствии предлагаемой методики требованиям существующей кадастровой системы РФ и позволяет провести внедрение с меньшими трудностями.

Апробация методики показала применимость современных геодезических методов сбора пространственной информации для задач трехмерного кадастра, эффективного управления в парадигме «умного города» и лесочетных работ со следующими выводами.

1 Применение совокупности подходов АФС с БПЛА и НЛС/МЛС к сбору трехмерной пространственной информации для задач 3D-кадастра оправдано и актуально на текущем этапе развития геодезических технологий.

2 Методические рекомендации, предложенные в работе, по расчету оптимальных параметров АФС для задач 3D-кадастра совершенствуют геодезическое сопровождение кадастровых работ и унифицируют получаемые данные.

3 Использование предлагаемых в работе связующих опознаков показало свою эффективность при объединении как с НЛС, так и МЛС.

4 Рекомендации по выполнению сканирования объектов для целей 3D-кадастра приведены для наиболее доступных приборов.

5 Составлена подробная схема реализации технологической цепочки моделирования ОН для задач 3D-кадастра, «умного города» и 3D LAS.

6 Проведена оценка точности пространственного положения, площади и отдельных геометрических элементов каждой модели объектов апробации. Погрешности соответствуют текущим требованиям ЕГРН.

7 Применение полученных данных не ограничивается визуализацией, а подразумевает многопрофильное долговременное использование с накапливающейся добавочной стоимостью.

8 Предложенная методика сбора и моделирования трехмерных пространственных данных в урбанизированных территориях отвечает требованиям по точности текущей кадастровой системы и опирается на международный опыт разработки трехмерных кадастровых систем, должна повысить качество государственного кадастрового учета и принимаемых управленческих решений по организации городских территорий, а также стать первым шагом в сторону создания трехмерных систем управления земельными ресурсами на городских территориях с выходом на концепцию «умного города».

9 Предложены рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования кадастровыми инженерами при выполнении кадастровых работ по сбору и моделированию трехмерных данных для наполнения системы 3D-ка-

дастра на территории РФ в соответствии с требованиями ЕГРН, а также при разработке нормативно-правовых актов и методических рекомендаций по созданию 3D-кадастра на территории РФ.

10 По результатам диссертационной работы сформулированы рекомендации на перспективу дальнейших исследований в этой области, которые должны включать разработку технических рекомендаций по созданию и организации инфраструктуры пространственных данных системы трехмерного кадастра, способной успешно функционировать и обрабатывать огромные потоки данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования достигнута поставленная цель – разработана методика сбора пространственных данных для целей 3D-кадастра, «умного города» и повышения эффективности управления урбанизированными территориями.

Итоги диссертационного исследования заключаются в следующем.

1 Выполнен аналитический обзор публикационной активности и вектора развития научного дискурса в мире и РФ в сфере трехмерного моделирования ОН и учета возникающих в реальном пространстве прав, обязанностей и ограничений.

2 Проведено теоретическое обоснование возможности интеграции гетерогенных форматов представления трехмерных данных (CityGML и IFC) при сохранении геодезической точности и повышении детальности результирующей базы данных ГИС.

3 Предлагается дифференцировать существующие виды ОН на категории моделирования для использования в 3D-кадастре и эффективном управлении урбанизированными территориями, а также ввести в СНиП кадастровый уровень проработки информационных моделей ОКС (BIM) для учета в ЕГРН.

4 Разработана усовершенствованная технологическая цепочка геодезического сопровождения кадастровых работ для целей 3D-кадастра, «умного города» и повышения эффективности управления урбанизированными территориями с применением ГИС/ЗИС, которая включает:

- алгоритм расчета оптимальных параметров АФС с БПЛА для задач 3D-кадастра;
- конструкцию связующего опознака для объединения данных АФС и лазерного сканирования в целях трехмерного моделирования ОН;
- алгоритм, параметры и инструментарий ПО открытого кода, используемые для обработки данных АФС и лазерного сканирования для последующего объеди-

нения в целях получения целостной, детальной и геопривязанной трехмерной модели ОН на урбанизированных территориях.

5 Осуществлена апробация на трех объектах предложенной усовершенствованной технологической цепочки и ее результатов в виде трехмерных моделей объектов недвижимости, которая позволяет решать задачи по сплошному моделированию при сохранении требуемой точности и увеличению детальности моделей для целей 3D-кадастра и 3DLAS в парадигме «умного города».

6 Полученные модели объектов апробации в форматах CityGML и IFC обеспечивают интеграцию с будущей системой 3D-кадастра, с ГИС управления «умного города» и градостроительными базами данных.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы кадастровыми инженерами при геодезическом сопровождении кадастровых работ по созданию 3D-моделей ОН в соответствии с требованиями ЕГРН, а также при разработке нормативно-правовых актов и методических рекомендаций по созданию 3D-кадастра на территории РФ.

Перспективы дальнейших исследований в этой области должны быть направлены на развитие процесса трансформации текущей системы кадастра с учетом особенностей отечественной юрисдикции и при соблюдении международных стандартов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АФС – аэрофотосъемка

БПЛА – беспилотный летательный аппарат

ГИС - географическая информационная система

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

ЕГРН – Единый государственный реестр недвижимости

ЗИС – земельная информационная система

ЗУ – земельный участок

ИЖС – индивидуальное жилищное строительство

МЛС – мобильное лазерное сканирование, мобильный лазерный сканер

НЛС – наземное лазерное сканирование, наземный лазерный сканер

ОКС – объект капитального строительства

ОН – объект недвижимости

ООН – Организация Объединенных Наций

Росреестр – Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии (Российская Федерация)

3D LAS – трехмерная система управления земельными ресурсами (Land Administration System)

Augmented Reality – дополненная реальность

Big data – большие данные

LADM – модель предметной области для управления недвижимостью (Land Administration Domain Model)

RRR – права, ограничения, обязанности (Rights, Restrictions, Responsibilities)

SDC – жизненный цикл пространственного развития территорий человеческого хозяйствования (Spatial Development lifeCycle - SDC)

SDG – цели устойчивого развития (Sustainable Development Goals)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Аврунев, Е. И. К вопросу о создании трехмерного кадастра на застроенных территориях / Е. И. Аврунев, В. В. Вылегжанина, И. А. Гиниятов. – Текст : непосредственный // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. – 2021. – № 1. – С. 25–30. – doi: 10.33764/2687-041X-2021-1-25-30.

2 Аврунев, Е. И. О некоторых важных аспектах выполнения кадастровых работ / Е. И. Аврунев, И. А. Гиниятов. – Текст : непосредственный // Нефтегазовый комплекс: проблемы и решения : материалы Третьей национальной научно-практической конференции с международным участием, Южно-Сахалинск, 02–04 декабря 2020 года. – Южно-Сахалинск : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2021. – С. 59–65.

3 Аврунев, Е. И. Опыт кадастровой системы в Германии и анализ потенциального заимствования лучших решений для государственного кадастра в России / Е. И. Аврунев, П. О. Барбашин. – Текст : непосредственный // Молодежь и современные информационные технологии : Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 22–26 марта 2021 года. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – С. 109–111.

4 Аврунев, Е. И. Пространственно-координатное обеспечение ведения 3D-кадастра в России / Е. И. Аврунев, А. И. Гиниятов. – Текст : непосредственный // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. – 2021. – № 1. – С. 31–37. – doi: 10.33764/2687-041X-2021-1-31-37.

5 Аврунев, Е. И. Цифровизация кадастровых систем и потенциальное влияние такой цифровизации на экономические процессы России / Е. И. Аврунев,

К. В. Шишков. – Текст : непосредственный // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 22–26 марта 2021 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – С. 181–182.

6 Алтынцев М. А. Применение технологии лазерного сканирования для моделирования объектов недвижимости в 3D-кадастре / М. А. Алтынцев, А. В. Чернов. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2018. – № 9. – С. 52–63. – doi: 10.22389/0016-7126-2018-939-9-52-63.

7 Бегляров, Н. С. Перспектива интеграции НЛС в единую методику сбора 3D-геопространственных данных / Н. С. Бегляров, А. Д. Джид. – Текст : непосредственный // Великие реки' 2019: Труды научного конгресса 21-го Международного научно-промышленного форума: в 3-х томах, Нижний Новгород, 14–17 мая 2019 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – Т. 1. – С. 307–310.

8 Бердюгина, А. А. Разработка структуры и содержания 3D-моделей объектов недвижимости в ЕГРН / А. А. Бердюгина, А. В. Чернов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 3 : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 2. – С. 87-98. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-3-2-87-98.

9 Волков, С. Н. Земельная политика: как сделать ее более эффективной / С. Н. Волков, В. Н. Хлыстун. – Текст : непосредственный // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2014. – №1-2. – С. 3–6.

10 Волков, С. Н. Землеустройство : учебник / С. Н. Волков. – Москва : ГУЗ, 2013. – 992 с. – Текст : непосредственный

11 Генералов, В. П. «Перспективы развития типологии высотных зданий – будущее городов» / В. П. Генералов, Е. М. Генералова. – Текст : непосредственный //

Вестник СГАСУ. Градостроительство и Архитектура. – 2015. – № 1 (18). – С. 13–18.

12 Горобцов, С. Р. Трехмерное моделирование и визуализация городских территорий с использованием современных геодезических программных средств / С. Р. Горобцов, А. В. Чернов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 4.

13 Государственный лесной реестр, государственная инвентаризация лесов и лесоустройство : материалы 3-й Международной научно-практической конференции. – Москва : ФГУП «Рослесинфорг», 2012. – Текст : непосредственный.

14 Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 29.12.2017) (с изм. и доп., вступ. в силу с 08.08.2018). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173884/. – Загл. с экрана (дата обращения: 13.10.2021). – Текст : электронный.

15 Гук, А. П. Использование цифровых моделей поверхности для дешифрирования зданий и выделения изменений объектов городской территории / А. П. Гук, С. А. Арбузов. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2011. – № 3. – С. 24–28.

16 Гук, А. П. Разработка методик создания 3D-моделей по аэрокосмическим снимкам высокого и сверхвысокого разрешения и другим данным дистанционного зондирования / А. П. Гук, М. М. Лазерко. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. С. – 32–34.

17 Гуссейнов, А. Н. Экологическое осмысление городских структур / А. Н. Гуссейнов, Г. И. Воронцов. – Текст : непосредственный // Архитектура и градостроительство России. – 1997. – № 3-4. – С. 16–20.

18 Дубровский, А. В. Методическое и технологическое обеспечение рационального землепользования при добыче углеводородов с учетом региональных особенностей крайнего севера / А. В. Дубровский, И. Н. Кустышева. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3 (35). – С. 128–138.

19 Жадан, М. С. Аналитический обзор зарубежного опыта учета 3D-моделей в кадастре / М. С. Жадан, А. В. Чернов, Д. В. Гоголев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 7 : Международная научно-технологическая конференция студентов и молодых ученых «Молодежь. Инновации. Технологии». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – С. 201–209.

20 Земельное администрирование: проект международного стандарта ISO 19152 : официальный сайт общественного объединения «Земельная реформа». – URL: <http://land-reform.com/> (дата обращения: 13.10.2021). – Текст : электронный

21 Земельный кодекс Российской Федерации : федеральный закон от 25.10.2001 № 136 (ред. от 03.08.2018). – URL: <https://base.garant.ru/12124624/>. – Текст : электронный.

22 Золотарев, И. И. Повышение экономической эффективности мониторинга в природопользовании и техносфере за счет применения современных геодезических технологий (средств лазерного сканирования) / И. И. Золотарев, А. В. Середович. – Текст : непосредственный// ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 2, ч. 2. – С 117–123.

23 Избранные проблемы и перспективные вопросы землеустройства, кадастров и развития территорий – 2017 : коллективная монография / В. В. Абросимов, Е. И. Аврунев, О. М. Антонова, С. А. Атаманов, И. А. Басова и др. ; под ред. А. П. Сизова. – Москва : Русайнс, 2018. – 262 с. – Текст : непосредственный.

24 Интеграция имитационных моделей для комплексной оценки экосистемных услуг лесов: методические подходы // П. Я. Грабарник, О. Г. Чертов, С. И. Чумаченко, В. Н. Шанин, Л. Г. Ханина, М. В. Бобровский, С. С. Быховец, П. В. Фролов. – Текст : непосредственный / Математическая биология и биоинформатика. – 2019. – Т. 14. – № 2. – С. 488–499. – doi:10.17537/2019.14.488.

25 Интеграция технических и гуманитарных наук как стратегия проблемно-ориентированного проектного обучения в сфере земельно-имущественных отно-

шений / Е. И. Аврунев, В. В. Вылегжанина, И. А. Гиниятов, В. А. Тимонов. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы образования. – 2021. – № 3. – С. 124–132.

26 Информационные ресурсы государственного кадастра недвижимости и территориального планирования в пространственном развитии государства : монография / Н. И. Бурмакина, А. В. Илюшин, Т. В. Илюшина, Е. А. Карфидова, Т. К. Колевид, А. Ф. Кораблин, З. С. Косаруков, А. А. Кузякова, О. В. Миклашевская, М. С. Чуприн, А. В. Пересветова, Т. Ф. Пушкина, А. П. Сизов ; под общей редакцией А. П. Сизова. – Москва : Русайнс, 2016. – 86 с. – Текст : непосредственный.

27 Кадастровые ошибки выявят с помощью 3D-моделей регионов. Информационное агентство REGNUM. – Текст : электронный. – URL: <https://regnum.ru/news/2363075.html> (дата обращения: 28.12.2017).

28 Калинова, Е. В. Создание 3D моделей архитектурных объектов из облака точек / Е. В. Калинова, А. Джадид. – Текст : непосредственный // Архитектура и строительство России. – 2018. – № 4. – С. 44–46.

29 Колодий, Н. А. Умный город: особенности концепции, специфика адаптации к российским реалиям / Н. А. Колодий, В. С. Иванова, Н. А. Гончарова. – Текст : непосредственный // Социологический журнал. – 2020. – Том 26. – № 2. – С. 102–123. – doi: 10.19181/socjour.2020.26.2.7268.

30 Комаревцева, О. О. О готовности муниципальных образований к внедрению технологий Smart City / О. О. Комаревцева. – Текст : электронный // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 5: Экономика. – 2017. – № 1 (195). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-gotovnosti-munitsipalnyh-obrazovaniy-k-vnedreniyu-tehnologiy-smart-city> (дата обращения: 30.07.2020).

31 Комиссаров, А. В. Теория и технология лазерного сканирования для пространственного моделирования территорий: диссертация ... доктора технических наук: 25.00.34 / Комиссаров Александр Владимирович ; [Место защиты: Сиб. гос.

ун-т геосистем и технологий]. – Новосибирск, 2016. – 278 с. – Текст : непосредственный.

32 Константинова, Е. А. Роль информации о существующих границах в территориальном планировании / Е. А. Константинова, А. П. Сизов. – Текст : непосредственный // Агротехнологии XXI века: стратегия развития, технологии и инновации : материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию основания университета, Пермь, 20 октября 2020 года. – Пермь : ИПЦ Прокрость, 2020. – С. 411–414.

33 Лазерко, М. М. Совместная обработка материалов аэрокосмических и наземных съемок для создания 3D моделей городских территорий: диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.34 / Лазерко Мария Михайловна; [Место защиты: Сиб. гос. геодез. акад.]. – Новосибирск, 2010. – 127 с. – Текст : непосредственный.

34 Лесной кодекс Российской Федерации : федеральный закон от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 09.03.2021). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (дата обращения 20.04.2021). – Текст : электронный.

35 Лисицкий Д. В. Картографическое отображение трехмерных моделей местности / Д. В. Лисицкий, В. С. Хорошилов, П. Ю. Бугаков. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 216–218.

36 Лисицкий, Д. В. Картографическая визуализация трехмерных моделей местности / Д. В. Лисицкий, П. Ю. Бугаков. – Текст : непосредственный // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 3 (16). – С. 87–93.

37 Лисицкий, Д. В. Методические основы цифрового трехмерного картографирования / Д. В. Лисицкий, П. Ю. Бугаков. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 6. – С. 37–42.

38 Лисицкий, Д. В. Перспективы развития картографии: от системы «Цифровая земля» к системе виртуальной геореальности / Д. В. Лисицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГГА. – 2013. – № 2 (22). – С. 8–16.

39 Лисицкий, Д. В. Пространственная локализация и правила цифрового описания объектов в трехмерном картографировании / Д. В. Лисицкий, Нгуен Ань Тай. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 190–195.

40 Лисицкий, Д. В. Теоретические основы трехмерного кадастра объектов недвижимости / Д. В. Лисицкий, А. В. Чернов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 153–171.

41 Максимов, С. Н. «Умный город»: к вопросу о понятии и концепции / С. Н. Максимов. – Текст : электронный // ПСЭ. – 2017. – № 1 (61). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/umnyy-gorod-k-voprosu-o-ponyatii-i-kontseptsii> (дата обращения: 22.07.2020).

42 Маркирование модельных деревьев на лесосеке для верификации данных, получаемых с использованием мобильного лазерного сканера ZEB-Horizon / Е. М. Митрофанов, Г. В. Анисочкин, Н. С. Бегляров, С. А. Богомолова. – Текст : непосредственный // Славянский форум. – 2021. – № 3 (33). – С. 354–359.

43 Миклашевская, О. В. Совершенствование государственной политики в сфере пространственного развития сельскохозяйственных территорий / О. В. Миклашевская, А. П. Сизов. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы землепользования и управления недвижимостью : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Екатеринбург, 2–3 апреля 2019 года / Ответственный редактор М. Е. Колчина. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2019. – С. 343–352.

44 Моисеев, Н. А. Леса России: проблемы, решения / Н. А. Моисеев. – Москва – Н. Новгород, 2010. – 604 с. – Текст : непосредственный.

45 Мокий, М. С. Трансдисциплинарность в высшем образовании: экспертные оценки, проблемы и практические решения / М. С. Мокий, В. С. Мокий. – Текст : электронный // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14526> (дата обращения: 27.07.2020).

46 Наземное лазерное сканирование: монография / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с. – Текст : непосредственный. – ISBN 978-5-87693-336-2.

47 Национальная технологическая инициатива: программа мер по формированию принципиально новых рынков и созданию условий для глобального технологического лидерства России к 2035 году. – URL: <http://asi.ru/nti/>. – Загл. с экрана. – Текст : электронный.

48 Нгуен, Ань Тай. Методика трехмерного моделирования земной поверхности / Нгуен Ань Тай, Дао Хыу Ши. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2015. – № 8. – С. 38–41. – doi: 10.22389/0016-7126-2015-902-8-38-41.

49 Никитин, В. Н. Определение разрешающей способности фотоаппарата по наклонным снимкам с использованием радиальных мир / В. Н. Никитин, А. В. Семенцов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 52–57.

50 Новые возможности применения трехмерного кадастра на застроенных территориях, обеспечивающие законные права собственников недвижимого имущества / Е. И. Аврунев, В. В. Вылегжанина, И. А. Гиниятов, В. А. Тимонов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 3 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. № 2. – С. 3–11. – doi: 10.33764/2618-981X-2021-3-2-3-11.

51 О внесении изменений в Градостроительный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в целях обеспечения комплексного развития территорий : Федеральный закон от 30.12.2020 № 494-ФЗ (последняя редакция). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372677/. – Текст : электронный.

52 О кадастровой деятельности : федеральный закон от 24.07.2007 № 221. – URL: <https://base.garant.ru/12154874/>. – Текст : электронный.

53 О Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года : распоряжение Правительства РФ от 17.11.2008 № 1662-р (ред. от 10.02.2017). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134/28c7f9e359e8af09d7244d8033c66928fa27e527/. – Текст : электронный.

54 Об утверждении концепции проекта цифровизации городского хозяйства «Умный город» : приказ Министра России от 25.12.2020 № 866/пр. – URL : <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/81884/>. – Текст : электронный.

55 Об утверждении Концепции федеральной целевой программы «Развитие единой государственной системы регистрации прав и кадастрового учета недвижимости (2014–2019 годы)» : распоряжение Правительства РФ от 28.06.2013 № 1101-р. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_96650/d76697ce20bf9b961b78e709417077da331bfd50/. – Текст : электронный.

56 Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») «Повышение качества государственных услуг в сфере государственного кадастрового учета недвижимого имущества и государственной регистрации прав на недвижимое имущество и сделок с ним» : распоряжение Правительства РФ от 01.12.2012 № 2236-р (ред. от 11.02.2017). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_139382/b02882b934df7c5e570a8359f9054bb2a0504820/. – Текст : электронный.

57 Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» : распоряжение Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_221756/48d8fcde0323439fed68fa60763c7429a0447942/. – Текст : электронный.

58 Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения или объ-

екта незавершенного строительства на земельном участке, а также требований к определению площади здания, сооружения, помещения, машино-места (Зарегистрировано в Минюсте России 16.11.2020 № 60938) : приказ Росреестра от 23.10.2020 № П/0393. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_368160/ (дата обращения: 16.05.2021).

59 Об утверждении формы технического плана и требований к его подготовке, состава содержащихся в нем сведений, а также формы декларации об объекте недвижимости, требований к ее подготовке, состава содержащихся в ней сведений (зарегистрировано в Минюсте России 02.03.2016 № 41304) : приказ Минэкономразвития России от 18.12.2015 № 953 (ред. от 25.09.2019). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_194903 (дата обращения: 15.10.2021). – Текст : электронный.

60 Опритова, О. А. Разработка требований к сбору и обработке данных аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов для моделирования геопространства: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 25.00.34 / Опритова Ольга Анатольевна; [Место защиты: Сиб. гос. ун-т геосистем и технологий]. – Новосибирск, 2018. – 24 с. – Текст : непосредственный.

61 Оценка влияния изменения плотности облака точек на точность автоматической сегментации / А. Г. Юнусов, А. Д. Джид, Н. С. Бегляров, М. А. Елшеви. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – № 7. – С. 47–55. – doi: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-47-55.

62 Павлова, Е. А. Развитие трехмерного кадастра объектов недвижимости в России / Е. А. Павлова. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2013. – № 8. – С. 40–42.

63 Папаскири, Т. В. О концепции цифрового землеустройства / Т. В. Папаскири. – Текст : непосредственный // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – Москва : ИД «Панорама», Издательство «Афина». – 2018. – № 11. – С. 5–11.

64 Папаскири, Т. В. Разработка Федеральной Целевой Программы «По созданию системы автоматизированного землеустроительного проектирования (САЗПР) и пакета прикладных программ (ППП) на выполнение первоочередных видов землеустроительных и смежных работ на территорию Российской Федерации». Землеустройство, кадастр и мониторинг земель / Т. В. Папаскири. – Текст : непосредственный. – Москва : ИД «Панорама», Издательство «Афина», 2014. – № 4. – С. 14–25.

65 Паспорт национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» (утв. президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам 24 декабря 2018 г. № 16). – URL: <http://government.ru/info/35568/>. – Текст : электронный.

66 Попков, А. В. Применение нейронных сетей и искусственного интеллекта для целей территориального планирования / А. В. Попков. – Текст : электронный // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. – 2013. – № 4 (28). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-neyronnyh-setey-i-iskusstvennogo-intellekta-dlya-tseley-territorialnogo-planirovaniya> (дата обращения: 29.07.2020).

67 Построение трехмерных моделей спортивных сооружений средствами лазерного сканирования (на примере Новосибирского биатлонного комплекса) / Д. В. Комиссаров, Е. В. Миллер, М. А. Аверков, В. В. Загородний. – Текст : непосредственный. // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 1, ч. 1. – С. 216–220.

68 Раклов, В. П. Об использовании измерительных реалистичных 3D-моделей при картографическом мониторинге городской среды / В. П. Раклов, Л. Г. Евстратова. – Текст : непосредственный // Землеустройство, кадастр, мониторинг земель. – 2018. – № 9 (164) – С. 63–69.

69 Росреестр : официальный сайт. – URL: <https://rosreestr.gov.ru/site/press/news/laboratoriya-budushchego-rosreestra/?contrast=N> (date of access: 03/07/2021). – Текст : электронный.

70 Рубанов, И. Н. Устойчивое развитие регионов России: интегральная оценка / И. Н. Рубанов, В. С. Тикунов – Текст : непосредственный // Географический вестник. – 2009. – № 3. – С. 69–76.

71 Сайт объединенной комиссии по 3D кадастрам Международной федерации геодезистов (FIG). – URL: <http://www.gdmc.nl/3DCadastres/>. – Текст : электронный.

72 Современные проблемы землеустройства и кадастров. Пространственное развитие территорий : учебник / А. П. Сизов, Е. А. Стыщенко, Д. М. Хомяков, Е. Г. Черных. – Москва : КноРус, 2022. – 218 с. – (Бакалавриат и магистратура). – Текст : непосредственный. – ISBN 978-5-406-08838-8.

73 СП 333.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла: дата введения 2021-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573514520> (дата обращения: 13.10.2021). – Текст : электронный.

74 Талапов, В. В. BentleySystems в Сингапуре: отель Марина БэйСэндс / В. В. Талапов. – 2017. – URL: <https://ardexpert.ru/article/11095>. – Загл. с экрана (дата обращения: 13.10.2021). – Текст : электронный.

75 Талапов, В. В. Внедрение BIM: впечатляющий опыт Сингапура / В. В. Талапов. – 2015. – URL: <https://ardexpert.ru/article/5160>. – Загл. с экрана (дата обращения: 13.10.2021). – Текст : электронный.

76 Талапов, В. В. Технология BIM: суть и основы внедрения информационного моделирования зданий / В. В. Талапов. – Москва : ДМК-пресс, 2015. – 410 с. – Текст : непосредственный.

77 Технология построения трехмерных моделей городов на основе топографических планов / И. В. Гуненко, Ю. С. Салтыкова, В. А. Середович, Д. В. Комиссаров. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск : СГГА, 2006. Т. 2, ч. 2. – С. 153–157.

78 Третьяков, А. Г. Современная система лесоучетных работ как основной инструмент управления лесами / А. Г. Третьяков. – Текст : непосредственный // Лесной Вестник. – 2013. – № 4. – С. 40–42.

79 Умные города как «столицы» цифровой экономики / В. П. Куприяновский, С. А. Буланча, К. Ю. Черных, Д. Е. Намиот, А. П. Добрынин. – Текст : электронный // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/umnye-goroda-kak-stolitsy-tsifrovoy-ekonomiki> (дата обращения: 30.07.2020).

80 «Умный город» как социально-политический проект: каким он будет в России? Экспертный круглый стол на факультете политологии МГУ / И. А. Василенко, С. В. Володенков, К. С. Гаджиев, В. И. Коваленко, А. П. Кочетков, А. Н. Люлько, А. И. Соловьев. – Текст : электронный // Власть. – 2020. – №1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/umnyy-gorod-kak-sotsialno-politicheskiy-proekt-kakim-on-budet-v-rossii-ekspertnyy-kruglyy-stol-na-fakultete-politologii-mgu> (дата обращения: 30.07.2020).

81 Хлыстун, В. Н. Институциональные основы формирования эффективной системы управления земельными ресурсами / В. Н. Хлыстун. – Текст : непосредственный // Землеустроительная наука и образование в России и за рубежом. Материалы Международного землеустроительного форума, посвященного проводимому под эгидой ООН Международного года почв и 180-летию высшего землеустроительного образования в России / под общ. ред. С. Н. Волкова, В. В. Вершинина. – Москва : ГУЗ, 2015. – С.17–25.

82 Чернов, А. В. Разработка и исследование методики формирования трехмерного кадастра объектов недвижимости: дис. ... канд. тех. наук / Чернов Александр Викторович ; ФГБОУ «Сибирский государственный университет геосистем и технологий». – Новосибирск, 2018. – Текст : непосредственный.

83 Чернов, А. В. Трехмерный кадастр - основной вектор развития успешной кадастровой системы / А. В. Чернов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономи-

ческое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 76–82.

84 Шаповалов, Д. А. Аналитический обзор развития многомерных систем учета и регистрации прав и объектов недвижимости в парадигме «умного города» / Д. А. Шаповалов, Н. С. Бегляров. – Текст : непосредственный // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2021. – № 3. – С. 185–192. – doi: 10.33920/sel-04-2103-04.

85 Шаповалов, Д. А. Современные проблемы землепользования : учебное пособие / Д. А. Шаповалов, А. А. Варламов, П. В. Ключин. – Москва : ГУЗ, 2013. – 221 с. – Текст : непосредственный.

86 Юнусов, А. Г. Сравнительный анализ норвежского, шведского и российско-голландского опыта представления трехмерных объектов кадастрового учета / А. Г. Юнусов, Н. С. Бегляров, А. Д. Джидид. – Текст : непосредственный // ЗЕМЛЕУСТРОИТЕЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И НАУКА ИЗ XVIII В XXI ВЕК : Международный научно-практический форум, посвященный 240-летию со дня основания Государственного университета по землеустройству : сб. науч. тр. в 2 ч. – 2019. – Ч. 2. – С. 89–98.

87 Яроцкая, Е. В. Применение геоинформационных систем в землеустройстве и кадастре для управления земельными ресурсами на муниципальном уровне в Карачаево-Черкесской Республике / Е. В. Яроцкая, А. М. Патов. – Текст : электронный // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2017. – № 4 (349). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-geoinformatsionnyh-sistem-v-zemleustroytve-i-kadastre-dlya-upravleniya-zemelnyimi-resursami-na-munitsipalnom-urovne-v> (дата обращения: 29.07.2020).

88 3D cadastral lifecycle: An information delivery manual ISO 29481 for 3D data extraction from the building permit application process / J. Oldfield, R. Bergs, P. Van Oosterom, T. Krijnen, M. Galano. – Текст : непосредственный // 7th International

FIG Workshop on the Land Administration Domain Model. Zagreb. – 2018. – P. 153–170.

89 3D Cadastre modelling in Russia / N. Vandysheva, V. Tikhonov, P. J. M. Van Oosterom, J. E. Stoter, H. D. Ploeger, R. Wouters, V. Penkov. – Текст : непосредственный // Proceedings of the FIG Working Week 2011" Bridging the Gap between Cultures" & 6th National Congress of ONIGT, Marrakech, Morocco, 18–22 May 2011. International Federation of Surveyors (FIG); Ordre National des Ing'nieurs.

90 3D Land Administration: A Review and a Future Vision in the Context of the Spatial Development Lifecycle / Kalogianni, Eftychia & Oosteom, Peter & Dimopoulou, Efi & Lemmen, Christiaan. – Текст : непосредственный // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2020. – 9. – 107. – 10.3390/ijgi9020107.

91 3D modeling of the ownership structure of condominium units / L. Li, J. Wu, H. Zhu, X. Duan, F. Luo. – Текст : непосредственный / Comput. Environ. Urban Syst. – 2016. – 59. – 50–63.

92 3D Modelling for Property Valuation in China / Y. Ying, M. Koeva, M. Kuffer, K. Asiama. – Текст : непосредственный // GIM Int. – 2019.

93 3D Real Property Legal Concepts and Cadastre – A Comparative Study of Selected Countries to Propose a Way Forward / Dimitrios Kitsakis, Jesper Paasch, Jenny Paulsson, Gerhard Navratil, Nikola Vučić, Marcin Karabin, Andrea Carneiro, Mohamed El Mekawy. – Текст : непосредственный. – 2016.

94 A BIM-Driven Approach to Managing Common Properties within Multi-Owned Developments / B. Atazadeh, A. Rajabifard, M. Kalantari, J. Shin. – Текст : непосредственный // 6th International FIG Workshop on 3D Cadastres. International Federation of Surveyors (FIG), Delft, The Netherlands. – 2018. – P. 201–216.

95 A topological enabled three-dimensional model based on constructive solid geometry and boundary representation / H. Ming, D. Yanzhu, Z. Jianguang, Z. Yong. – Текст : непосредственный // Clust. Comput. – 2016. – 19. – 2027–2037.

96 A two-level topological model for 3D features in CityGML / L. Li, F. Luo, H. Zhu, S. Ying, Z. Zhao. – Текст : непосредственный // *Comput. Environ. Urban Syst.* – 2016. – 59. – 11–24.

97 Abdul-Rahman, A. 2D and 3D Spatial Data Representations / A. Abdul-Rahman, M. Pilouk. – Текст : непосредственный // *In Spatial Data Modelling for 3D GIS.* – 2007. – Berlin: Springer. – P. 30.

98 Acuto, M. *Global Cities, Governance and Diplomacy: The Urban Link* / M. Acuto. – Oxon: Routledge, 2013. – Текст : непосредственный.

99 Aien, A. *3D Cadastral Data Modelling: Dis. ... Candidate of Doctor of Philosophy.* Melbourne, 2013. – Текст : непосредственный.

100 Alkan, M. *Analysis of Studies on the Land Administration Domain Model in Turkey* / M. Alkan, Z. A. Polat. – Текст : непосредственный // *Proceedings 7th LADM Workshop.* Zagreb, Croatia. – 2018. – P. 213–222.

101 *An LADM-based Approach for Developing and Implementing a National 3D Cadastre – A Case Study of Malaysia* / A. Rajabifard, M. Agunbiade, M. Kalantari, K. M. Yip, B. Atazadeh, F. Badiie, D. M. N. Bin Isa, M. K. Bin Adimin, K. L. Chan, A. Aien, H. Olfat, D. Shojaei, M. R. Anaraki ; C. Lemmen, P. van Oosterom (Eds.). – Текст : непосредственный // *7th International FIG Workshop on the Land Administration Domain Model.* Zagreb, Croatia. – 2018. – P. 47–66.

102 *An uniform real-estate registration model for China* / S. Ying, R. Guo, L. Li, N. Chen, Y. Jia. – Текст : непосредственный // *6th International Fig. 3D Cadastre Workshop.* Delft, The Netherlands. – 2019. – P. 421–448.

103 *Analysis of the Third FIG 3D Cadastres Questionnaire: Status in 2018 and Expectations for 2022 Conference* / Shnaidnman, Anna & Oosterom, Peter & Lemmen, Christiaan & Ploeger, Hendrik & Karki, Sudarshan. – Текст : непосредственный // *FIG Working Week 2019 Geospatial information for a smarter life and environmental.* – Hanoi : Vietnam, 2019.

104 *Application of LADM for the integration of land and housing information in China: the legal dimension* / Y. Zhuo, Z. Ma, C. Lemmen, R. M. Bennett. – Текст :

электронный // Land Use Policy 49. – 2015. – 634–648. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.09.005>.

105 Applications of 3D City Models: State of the art review / F. Biljecki, J. Stoter, H. Ledoux, S. Zlatanova, A. Çöltekin. – Текст : непосредственный // ISPRS Int. J. Geo-Information 4. – 2015. – 2842–2889.

106 Atazadeh, B. Assessing performance of three BIM-based views of buildings for communication and management of vertically stratified legal interests / B. Atazadeh, R. Abbas, K. Mohsen. – Текст : непосредственный // ISPRS Int. J. Geo-Inf. – 2017. – 198(6). – 1–22.

107 Atazadeh, B. Comparing Three Types of BIM-based Models for Managing 3D Ownership Interests in Multi-level Buildings / B. Atazadeh, M. Kalantari, A. Rajabifard. – Текст : непосредственный // 5th International Fig. 3D Cadastre Workshop. International Federation of Surveyors (FIG), Athens, Greece. – 2016. – P. 183–198.

108 Atazadeh, Behnam. Connecting LADM and IFC Standards: Pathways towards an Integrated Legal-Physical Model / Behnam Atazadeh, Abbas Rajabifard, Mohsen Kalantari. – 2018. – Текст : непосредственный.

109 Automated 3D wireframe modeling of indoor structures from point clouds using constrained least-squares adjustment for as-built BIM./ J. Jung, S. Hong, S. Yoon, J. Kim, J. Heo. – Текст : непосредственный // J. Comput. Civ. Eng. – 2016. – 30. – 04015074.

110 Automatic conversion of IFC datasets to geometrically and semantically correct CityGML LOD3 buildings / S. Donkers, H. Ledoux, J. Zhao, J. Stoter. – Текст : электронный // Trans. in GIS, 20. – 2016. – 547–569. – URL: <https://doi.org/10.1111/tgis.12162>.

111 Aydinoglu, A. C. Generic land registry and cadastre data model supporting interoperability based on international standards for Turkey / A. C. Aydinoglu, R. Bovkir. – Текст : электронный // Land Use Policy. – 2017. – 68. – 59–71. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.07.029>.

112 Batty, Michael. Big data, smart cities and city planning. / Michael Batty. – Текст : непосредственный // *Dialogues in Human Geography*. – 2013. – 3. – 274–279. – 10.1177/2043820613513390.

113 Begliarov, N. Generating a three-dimensional measuring scene for the forest sector as based on modern geodetic technologies / N. Begliarov, E. Mitrofanov, V. Kiseleva. – Текст : непосредственный // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 875 (2021) 012083. – 2021. – doi:10.1088/1755-1315/875/1/012083.

114 Bettencourt, L. M. A. The Origins of Scaling in Cities / L. M. A. Bettencourt. – Текст : непосредственный // *Science*. – 2013. – 340. – P. 1438–1441.

115 Biljecki, F. CityGML Application Domain Extension (ADE): overview of developments / F. Biljecki, K. Kumar, C. Nagel. – Текст : электронный // *Open geospatial data, softw. stand.* – 2018. – 3. – 13. – URL: <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0055-6>.

116 Biljecki, F. Redefining the level of detail for 3D models / F. Biljecki, H. Ledoux, J. Stoter. – Текст : непосредственный // *GIM International*. – 2014. – 28 (11). – 21–23.

117 Billen, Roland. 3D Spatial Relationships Model: a Useful Concept for 3D Cadastre? / Roland Billen, Sisi Zlatanova. – Текст : непосредственный // *Computers, Environment and Urban Systems*. – 2003 – 27. – 411–425. – 10.1016/S0198-9715(02)00040-6.

118 BIM and 3D property visualization / M. Andr'ee, J. Paasch, J. Paulsson, S. Seipel. – Текст : непосредственный // *FIG Congress 2018, Istanbul, Turkey, May 6–11, 2018*.

119 Bloomberg, M. City Century: Why Municipalities are the Key to Fighting Climate Change / M. Bloomberg. – Текст : непосредственный // *Foreign Affairs*. – 2015. – 94 (2). – P. 116.

120 Bonczak, B. Large-scale parameterization of 3D building morphology in complex urban landscapes using aerial LiDAR and city administrative data / B. Bonczak, C. E. Kontokosta. – Текст : непосредственный // *Comput. Environ. Urban Syst.* – 2019. – 73. – 126–142.

121 Book Research and Development Progress in 3D Cadastral Systems / Peter van Oosterom, Efi Dimopoulou (editors). – MDPI, Basel, Switzerland, October 2019, Printed Edition of the Special Issue Published in International Journal of Geo-Information. – 302 p. – Текст : непосредственный. – ISBN 978-3-03921-056-5 (Pbk); ISBN 978-3-03921-057-2 (PDF).

122 Building information modelling for high-rise land administration / B. Atazadeh, M. Kalantari, A. Rajabifard, S. Ho, T. Ngo. – Текст : электронный // Trans. GIS. – 2017. – 21. – 91–113. – URL: <https://doi.org/10.1111/tgis.12199>.

123 Can Data from BIMs be Used as Input for a 3D Cadastre? / J. Oldfield, P. Oosterom, W. Quak, J. Veen, J. Beetz. – Текст : электронный // The 5th International FIG 3D Cadastre Workshop. – Athens, Greece, 2016. – URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_21.pdf. – Загл. с экрана. (дата обращения: 13.10.2021).

124 Chandrasekar, K. S. A comparative analysis of smart city initiatives by China and India – Lessons for India / K. S. Chandrasekar, B. Vajracharya, D. O'Hare. – Bond University, Gold Coast, 2016. – Текст : непосредственный.

125 Cities Lead the Way in Climate–Change Action / C. Rosenzweig, W. Solecki, S. A. Hammer, S. Mehrotra. – Текст : непосредственный // Nature. – 2010. – 467 (7318). – P. 909–911.

126 Combination of terrestrial laser scanning with high resolution panoramic images for investigations in forest applications and tree species recognition / Haala N. et al. – Текст : непосредственный // Proceedings of the ISPRS working group V/1. – 2004. – №. PART 5/W16.

127 Complex Economic Activities Concentrate in Large Cities / Balland, Pierre & Jara Figueroa, Cristian & Petralia, Sergio & Steijn, Mathieu & Rigby, David & Hidalgo, Cesar. – Текст : непосредственный // SSRN Electronic Journal. – 2018. – 10.2139/ssrn.3219155.

128 Construction of 3D Volumetric Objects for a 3D Cadastral System / S. Ying, R. Guo, L. Li, P. Van Oosterom, J. Stoter. – Текст : электронный // Transactions in GIS. – 2015. – 19. – 758–779. – URL: <https://doi.org/10.1111/tgis.12129>.

129 Converting The Strata Building to LADM, in: Proceedings FIG Working Week 2017: Surveying the World of Tomorrow – From Digitalization to Augmented Reality / H. Jamil, I. S. A. Mohd Noor, T. CheeHua, K. L. Chan, A. A. Rahman, I. A. Musliman, U. Ujang, I. Hassan, S. Bernad, H. Karim. – Текст : непосредственный // FIG (International Federation of Surveyors). – 2017.

130 Delft University of Technology. – URL: <https://wiki.tudelft.nl/bin/view/Research/ISO19152/LadmPublications> (дата обращения 20.05.2020). – Текст : электронный.

131 Deng, Y. Mapping between BIM and 3D GIS in different levels of detail using schema mediation and instance comparison / Y. Deng, J. C. P. Cheng, C. Anumba. – Текст : непосредственный // Autom. Constr. – 2016. – 67. – 1–21.

132 Design of the 3D Cadastre Model and Development of the Prototype in the Russian Federation / N. Vandysheva, A. Ivanov, S. Pakhomov, B. Spiering, J. E. Stoter, S. Zlatanova, P. J. M. Van Oosterom. – Текст : непосредственный // Proceedings 2nd International Workshop on 3D Cadastres, Delft, The Netherlands, 16–18 November, 2011. International Federation of Surveyors (FIG).

133 Designing Open Spatial Information Infrastructure to Support 3D Urban Planning in Jakarta Smart City Designing Open Spatial Information Infrastructure to Support 3D Urban Planning in Jakarta Smart City / Indrajit, Agung & Ploeger, Hendrik & Loenen, B. & Oosterom, Peter. – 2019. – Текст : непосредственный.

134 Development of a 3D underground cadastral system with indoor mapping for As-built BIM: the case study of Gangnam subway station in Korea / S. Kim, J. Kim, J. Jung, J. Heo. – Текст : электронный // Sensors 15. – 2015. – 30870–30893. – URL: <https://doi.org/10.3390/s151229833>.

135 Dore, C. Current state of the art historic building information modelling, in: International Archives of the Photogrammetry / C. Dore, M. Murphy. – Текст : непо-

средственный // Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives. – 2017. – Ottawa, Canada. – P. 185–192.

136 El-Mekawy, M. Integration of 3D Cadastre, 3D Property Formation and BIM in Sweden / M. El-Mekawy, J. Paasch, J. Paulsson. – Текст : непосредственный // 4th International Workshop on 3D Cadastres 9–11 November 2014, Dubai, United Arab Emirates. – P. 17–34.

137 Eroshenkova, D. A. Automated Determination Of Forest-Vegetation Characteristics With The Use Of A Neural Network Of Deep Learning / D. A. Eroshenkova, V. I. Terekhov, S. I. Chumachenko. – Текст : непосредственный // Studies in Computational Intelligence. – 2020. – Т. 856. – С. 295–302.

138 EU BIM Task Group. Handbook for the Introduction of Building Information Modelling by the European Public Sector Strategic Action for Construction Sector Performance: Driving Value, Innovation and Growth; European Union: 2017, Luxembourg, Luxembourg. – Текст : непосредственный.

139 Extending CityGML for IFC-sourced 3D city models / Filip Biljecki, Joie Lim, James Crawford, Diana Moraru, Helga Tauscher, Amol Konde, Kamel Adouane, Simon Lawrence, Patrick Janssen, Rudi Stouffs. – Текст : электронный // Automation in Construction. – 2021. – Volume 121. – 103440. – ISSN 0926-5805. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103440>.

140 G'ozdz, K. J. Developing the information infrastructure based on LADM – the case of Poland / K. J. G'ozdz, P. van Oosterom. – Текст : непосредственный // Surv. Rev. 48. – 2016. – 168–180.

141 Gkeli, M. LADM-based Crowdsourced 3D Cadastral Surveying – Potential and Perspectives / M. Gkeli, C. Potsiou, C. Ioannidis. – Текст : непосредственный // 6th International Fig. 3D Cadastre Workshop. Delft, The Netherlands. – 2018. – P. 17–38.

142 Griffith-Charles, C. Capturing Legal and Physical Boundary Differences in 3D Space – A Case Study of Trinidad and Tobago / C. Griffith-Charles, M. Sutherland, D. Davis ; P. van Oosterom, E. Dimopoulou, E. M. Fendel (Eds.). – Текст : непосред-

ственный // Proceedings of the 5th International Workshop on 3D Cadastres. Athens, Greece. – P. 433–446.

143 Groger, G. CityGML – Interoperable semantic 3D city models / G. Groger, L. Plümer. – Текст : электронный // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. – 2012. – 71. – 12–33. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004>.

144 Ho, S. Invisible constraints on 3D innovation in land administration: A case study on the city of Melbourne / S. Ho, A. Rajabifardand, M. Kalantari. – Текст : непосредственный // Land Use Policy 42. – 2015. – P. 412–425.

145 Improvement of the Korean LADM country profile to build a 3D cadastre model / В.-М. Lee, Т.-J. Kim, В.-Y. Kwak, Y. Lee, J. Choi. – Текст : электронный // Land Use Policy 49. – 2015. – 660–667. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.10.012>.

146 Informal settlement classification using point-cloud and image-based features from UAV data / C. M. Gevaert, C. Persello, R. Sliuzas, G. Vosselman. – Текст : непосредственный // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. – 2017. – 125. – 225–236.

147 Initial 3D Cadastre Registration in the Republic of Croatia by Cadastral Resurvey / M. Mader, N. Vucic, S. Vranic, M. Roic. – Текст : непосредственный // 6th International Fig. 3D Cadastre Workshop. Delft, The Netherlands. – 2018. – P. 57–74.

148 Initial Analysis of the Second FIG 3D Cadastres Questionnaire: Status in 2014 and Expectations for 2018 / Peter van Oosterom, Jantien Stoter, Hendrik Ploeger, Christiaan Lemmen, Rod Thompson, Sudarshan Karki. – Текст : непосредственный // 4th International Workshop on 3D Cadastres, 9–11 November 2014. – Dubai, United Arab Emirates, 2014.

149 ISO 16739, Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries (IFC) ISO, Geneva, Switzerland, 2013. – Текст : непосредственный.

150 Janečka, K. A country profile of the Czech republic based on an LADM for the development of a 3D cadastre / K. Janečka, P. Souček. – Текст : электронный // IJGI 6, 143. – 2017. – URL: <https://doi.org/10.3390/ijgi6050143>.

151 Jones, B. F. The Burden of Knowledge and the “Death of the Renaissance Man”: Is Innovation Getting Harder? / B. F. Jones. – Текст : непосредственный // *Rev Econ Stud.* – 2009. – 76. – P. 283–317.

152 Kalogianni, E. Design of a 3D multipurpose land administrative system for Greece in the context of LADM / E. Kalogianni. – Текст : непосредственный // Athens, Natl. Tech. Univ. Athens (NTUA, Master Thesis). – 2015.

153 Khanna, P. Connectography: Mapping the Future of Global Civilization / P. Khana. – New York : Random House, 2016. – Текст : непосредственный.

154 Kitsakis, D. Three-dimensional cadastre modelling of customary real property rights / D. Kitsakis, C. Apostolou, E. Dimopoulou. – Текст : непосредственный // *Surv. Rev.* – 2018. – 50. – 107–121.

155 Koeva, M. N., October 2019. Lecture notes on 3D modelling elective course / M. N. Koeva. – Faculty ITC, University of Twente, Enschede, The Netherlands. – 2019. – Текст : непосредственный.

156 Kosovac, Anna. Acknowledging Urbanization: A Survey of the Role of Cities in UN Frameworks / Anna Kosovac, Michele Acuto, Terry Jones. – Текст : непосредственный // *Global Policy.* – 2020. – 10.1111/1758-5899.12783.

157 LADM-based modeling of the unified registration of immovable property in China / C. Yu, L. Li, B. He, Z. Zhao, X. Li. – Текст : электронный // *Land Use Policy* 64. – 2017. – 292–306. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.02.034>.

158 Lemmen, C. The land administration domain model / C. Lemmen, P. V. Oosterom, R. Bennett. – Текст : непосредственный // *Land Use Policy.* – 2015. – 49. – 535–545.

159 Lessons learned from the creation of the LADM based country profiles / K. Janečka, J. Bydłoz, A. Radulović, N. Vučić, D. Sladić, M. Govedarica. – Текст : непосредственный // *Proceedings 7th LADM Workshop.* – 2018. – Zagreb, Croatia. – P. 171–192.

160 Linking BIM and GIS Models in Infrastructure by Example of IFC and CityGML / Simon Vilgertshofer, Julian Amann, Bruno Willenborg, Andre Borrmann,

Thomas Kolbe. – 2017. – 133–140. – Текст : непосредственный. – 10.1061/9780784480823.017.

161 Linking Land Administration Domain Model and BIM environment for 3D digital cadastre in multi-storey buildings / Behnam Atazadeh, Hamed Olfat, Abbas Rajabifard, Mohsen Kalantari, Davood Shojaei, Afshin Mesbah Marjani. – Текст : электронный // Land Use Policy. – 2021. – Volume 104. – 105367. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105367>. – ISSN 0264-8377

162 Liu, Hui. Smart Cities: Big Data Prediction Methods and Applications / Liu Hui. – 2020. – Текст : непосредственный. – 10.1007/978-981-15-2837-8.

163 Mađer, M. Analysis of possibilities for linking land registers and other official registers in the Republic of Croatia based on LADM / M. Mađer, H. Matijević, M. Roić. – Текст : электронный // Land Use Policy 49. – 2015. – 606–616. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.10.025>.

164 Mahesa, Restu. Platform Ecosystems for Indonesia Smart Cities / Mahesa, Restu & Yudoko, Gatot & Anggoro, Yudo. – 2018. – 34–39. – Текст : непосредственный. – 10.1109/IC3INA.2018.8629537.

165 Modeling cities and landscapes in 3D with CityGML / Ken Arroyo Ohoi, Filip Biljecki, Kavisha Kumar, Hugo Ledoux and Jantien Stoter. In André Borrmann, Markus König, Christian Koch and Jakob Beetz (eds.). – Текст : непосредственный // Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice, Springer, September 2018. – P. 199–215. – ISBN 978–3–319–92861–6 (Print) 978–3–319–92862–3 (Online). – doi: 10.1007/978-3-319-92862-3_11.

166 Moir, E. What are Future cities? Origin, meaning and uses. London, Catapult Future Cities, Foresight, United Kingdom / E. Moir, T. Moonen, G. Clark. – 2014. – Текст : непосредственный.

167 New Trends in Using Augmented Reality Apps for Smart City Contexts / Ramos, Francisco & Trilles Oliver, Sergi & Torres-Sospedra, Joaquín & Perales, Francisco. – Текст : непосредственный // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2018. – 7. – 478. 10.3390/ijgi7120478.

168 OGC City Geography Markup Language (CityGML) En-Coding Standard / G. Groger, T. Kolbe, C. Nagel, K. H. Hafele. – Текст : непосредственный // Open Geospatial Consort. Wayland, MA, USA. – 2012.

169 OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard v 2.0 / G. Gröger, T. H. Kolbe, C. Nagel, K. H. Häfele. – Текст : непосредственный // OGC Doc. – 2012. – 12-019.

170 Parnell, S. Defining a Global Urban Development Agenda / S. Parnell. – Текст : непосредственный // World Development. – 2016. – 78. – P. 529–540.

171 Paulsson, J. The land administration domain model – a literature survey / J. Paulsson, J. M. Paasch. – Текст : электронный // Land Use Policy. – 2015. – 49. – 546–551. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.08.008>.

172 Piaget, Jean. «L'épistémologie des relations interdisciplinaires», in Léo Apostel et al. / Jean Piaget. – 1972. – P. 144. – Текст : непосредственный.

173 Polat, Z. A. Design and implementation of a LADM-based external archive data model for land registry and cadastre transactions in Turkey: a case study of municipality / Z. A. Polat, M. Alkan. – Текст : электронный // Land Use Policy. – 2018. – 77. – 249–266. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.010>.

174 Processing BIM and GIS Models in Practice: Experiences and Recommendations from a GeoBIM Project in The Netherlands / K. Arroyo Ohori, A. Diakité, T. Krijnen, H. Ledoux, J. Stoter. – Текст : электронный // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2018. – 7(8):311. – URL: <https://doi.org/10.3390/ijgi7080311>.

175 Proposal for a new LOD and multi-representation concept for CityGML / M. O. Löwner, G. Gröger, J. Benner, F. Biljecki, C. Nagel. – Текст : непосредственный // 11th 3D Geoinfo conference. – 2016.

176 Purificação, N. R. S. A proposal for modeling and implementing an integrated system for Brazilian cadastres according to ISO 19152:2012 / N. R. S. Purificação, A. F. T. da Carneiro, R. P. Julião. – Текст : непосредственный // Land Administration Domain Model. Bol. De. Ciências Geodésicas 25, 25. – 2019.

177 Radulović, A. Serbian profile of the land administration domain model / A. Radulović, D. Sladić, M. Govedarica. – Текст : непосредственный // FIG Work. Week, Surv. world tomorrow-From Digit. to Augment. reality, Helsinki 2017. – 8698. – 1–13.

178 Radulović, A. Towards 3D cadastre in Serbia: Development of Serbian Cadastral Domain Model / A. Radulović, D. Sladić, M. Govedarica. – Текст : электронный // IJGI – 2017. – 6. – 312. – URL: <https://doi.org/10.3390/ijgi6100312>.

179 Registration of multi-level property rights in 3D in The Netherlands: two cases and next steps in further implementation / J. Stoter, H. Ploeger, R. Roes, E. van der Riet, F. Biljecki, H. Ledoux, D. Kok, S. Kim. – Текст : электронный // IJGI. – 2017. – 6. – 158. – URL: <https://doi.org/10.3390/ijgi6060158>.

180 Rodríguez Molano, José. Big Data Tools for Smart Cities / Rodríguez Molano, José & Bravo, Leonardo & Lopez Santana, Eduyn. – 2018. – Текст : непосредственный. – 10.1007/978-3-319-93803-5_61.

181 Roić, M. Upravljanje zemljišnim informacijama – Katastar / M. Roić. – Текст : непосредственный. – University of Zagreb, Faculty of Geodesy, Zagreb, Croatia, 2012.

182 Rösndorff, C. Integration of land administration domain model with CityGML for 3D Cadastre / C. Rösndorff, D. Wilson, J. Stoter. – 2014. – Текст : непосредственный.

183 Salheb, N. Automatic conversion of CITYGML to IFC, Int. Arch. Photogramm / N. Salheb, K. Arroyo Ohoiri, J. Stoter. – Текст : электронный // Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIV-4/W1-2020. – 2020. – 127–134. – URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W1-2020-127-2020>, 2020.

184 Sani, M. J. Extraction and transformation of IFC data to CITYGML format, Int. Arch. Photogramm / M. J. Sani, I. A. Musliman, A. Abdul Rahman. – Текст : электронный // Remote Sens. Spatial Inf. Sci. – XLII-4/W16. – 595–601. – URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-595-2019>, 2019.

185 Scott, A. J. The Nature of Cities: The Scope and Limits of Urban Theory / A. J. Scott, M. Storper. – Текст : непосредственный // International Journal of Urban and Regional Research. – 39. – P. 1–15.

186 Semi-automated approach to indoor mapping for 3D as-built building information modeling / S. Hong, J. Jung, S. Kim, H. Cho, J. Lee, J. Heo. – Текст : непосредственный // Comput. Environ. Urban Syst. – 2015. – 51. – 34–46.

187 Smart Cities and Economic Growth in Russia / B. S. Sergi, A. Berezin, N. Gorodnova, I. Andronova. – Текст : электронный // Modeling Economic Growth in Contemporary Russia, Emerald Publishing Limited. – 2019. – P. 249–272. – URL: <https://doi.org/10.1108/978-1-78973-265-820191010>.

188 Soon, K. H. CITYGML Modelling for Singapore National Mapping, Int. Arch. Photogramm / K. H. Soon, V. H. S. Khoo. – Текст : электронный // Remote Sens. Spatial Inf. Sci. – 2017. – XLII-4/W7. – 37–42. – URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W7-37-2017>.

189 Steps towards 3D Cadastre and ISO 19152 (LADM) in Israel / Y. Felus, S. Barzani, A. Caine, N. Blumkine, P. van Oosterom. – Текст : непосредственный // 4th International Workshop on 3D Cadastres. Dubai, United Arab Emirates. – 2014. – P. 391–409.

190 Stoter, J. 3D cadastre in the Netherlands: developments and international applicability / J. Stoter, H. Ploeger, P. van Oosterom. – Текст : электронный // Comput. Environ. Urban Syst. 40. – 2013. – 56–67. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurb-sys.2012.08.008>.

191 Stoter, J. E. Property in 3D: registration of multiple use of space : current practice in Holland and the need for a 3D cadastre / J. E. Stoter, H. D. Ploeger. – Текст : электронный // Computers, environment and urban systems. – 2003. – 27(6). – 553–570. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(03\)00014-0](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(03)00014-0).

192 Stoter, J. Registration of 3D Situations in Land Administration in the Netherlands / J. Stoter, H. Ploeger, W. Louwman. – Текст : непосредственный // Proceedings 2nd International Workshop on 3D Cadastres, Delft, the Netherlands. – 2011.

193 Stouffs, R. Achieving Complete and Near-Lossless Conversion from IFC to CityGML / R. Stouffs, H. Tauscher, F. Biljecki. – Текст : электронный // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2018. – 7(9):355. – URL: <https://doi.org/10.3390/ijgi7090355>.

194 Sun, J. BIM-based Approach for Swedish 3D Cadastral Management / J. Sun, J. Paulsson. – Текст : непосредственный // FIG Working Week 2020.

195 Sustainability and Resilience for Transformation in the Urban Century / T. Elmqvist, E. Andersson, N. Frantzeskaki, T. McPhearson, P. Olsson, O. Gaffney et al. – Текст : непосредственный // Nature Sustainability. – 2019. – 2 (4). – P. 267–273.

196 Tekavec, J. Pregled raziskav na področju 3D-katastra nepremičnin / J. Tekavec, M. Ferlan, A. Lisec. – Текст : непосредственный // Geodetski vestnik. – 2018. – 62 (2). – P. 249–278. – doi: 10.15292/geodetskivestnik. 2018.02.249-278.

197 The City As a Global Political Actor / S. Oosterlynck, L. Beeckmans, D. Bas-sens, B. Derudder, B. Segaert, L. Braeckmans (eds.). – New York : Routledge, 2018. – Текст : непосредственный.

198 The Energy Application Domain Extension for CityGML: enhancing interoperability for urban energy simulations / G. Agugiaro, J. Benner, P. Cipriano, R. Nouvel. – Текст : непосредственный // Open Geospatial Data Softw. Stand. 3, 2. – 2018.

199 The importance of Malaysian Land Administration Domain Model country profile in land policy / N. A. Zulkifli, A. Abdul Rahman, P. van Oosterom, L. C. Tan, H. Jamil, C. H. Teng, K. S. Looi, K. L. Chan. – Текст : электронный // Land Use Policy 49. – 2015. – 649–659. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.07.015>.

200 The possibilities of using CityGML for 3D representation of buildings in the cadastre / K. J. G'ozdz, W. Pachelski, P. J. M. Van Oosterom, V. Coors. – Текст : непосредственный // Proceedings 4th International Workshop on 3D Cadastres, 9–11 November 2014, Dubai, United Arab Emirates. International Federation of Surveyors (FIG). – P. 339–362.

201 The Role of Big Data in Smart City / Hashem, Ibrahim & Chang, Victor & Anuar, Nor & S., Adewole & Yaqoob, Ibrar & Gani, Abdullah & Ahmed, Ejaz & Chi-

roma, Naruna. – Текст : непосредственный // International Journal of Information Management. – 2016. – 36. – 10.1016/j.ijinfomgt.2016.05.002.

202 The Role of the revised land administration domain model and spatial data infrastructure in improving ease of doing business in Indonesia / Agung Indrajit, Virgo Jaya, B. Loenen, Christiaan Lemmen, Peter Oosterom, Hendrik Ploeger, Robertus Theodore. – 2020. – Текст : непосредственный.

203 Tin meets CAD - extending the TIN concept in GIS / R.O.C. Tse, C.M. Gold ; In P. M. A. Sloot, C. J. K. Tan, J. Dongarra, and A. G. Hoekstra, editors. – Текст : непосредственный // Computational Science – ICCS 2002, International Conference, Proceedings of Part III. Lecture Notes in Computer Science, volume 2331, pages 135–143, Amsterdam, the Netherlands, 2002. Springer-Verlag.

204 Towards 3D Utility Network Cadastre: Extended Serbian LADM Country Profile / A. Radulović, D. Sladić, M. Govedarica, A. Ristić, D. Jovanović. – Текст : непосредственный // 6th International Fig. 3D Cadastre Workshop. Delft, The Netherlands. – 2018. – P. 95–110.

205 Towards a Croatian 3D cadastre based on the LADM / N. Vučić, M. Mađer, M. Roić, S. Vranić. – Текст : непосредственный // 4th International Workshop on Geoinformation Science: GeoAdvances 2017. – P. 399–409.

206 Towards integration of 3D legal and physical objects in cadastral data models / A. Aien, M. Kalantari, A. Rajabifard, I. Williamson, J. Wallace. – Текст : непосредственный // Land Use Policy. – 2013. – 35. – 140–154.

207 Towards Malaysian LADM country profile for 2D and 3D cadastral registration system / N. A. Zulkifli, A. Abdul Rahman, H. Jamil, C. H. Teng, L. C. Tan, K. S. Looi, K. L. Chan, P. J. M. Van Oosterom. – Текст : непосредственный / Proceedings of the 25th FIG Congress: Engaging the Challenges, Enhancing the Relevance, Kuala Lumpur, Malaysia, June 16–21, 2014. FIG International Federation of Surveyors.

208 Transition from 2D to 3D real property cadastre / Petra Drobež, Mojca Kosmatin Fras, Miran Ferlan, Anka Lisec. – Текст : электронный // The case of the Slovenian cadastre, Computers, Environment and Urban Systems. – Volume 62. – 2017. –

P. 125–135. – ISSN 0198-9715. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurb-sys.2016.11.002>.

209 United Nations. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development / United Nations. – 2015. – URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf> (accessed on 27 July 2020). – Текст : электронный.

210 Urban 3D modelling methods: a state of the art review / Yue Ying, M. Koeva, Monika Kuffer, J. Zevenbergen. – Текст : непосредственный // ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLIII-B4-2020. – 2020. – 699–706. – 10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2020-699-2020.

211 Urban Planet / Elmqvist, T. (eds.) et al. // Cambridge: Cambridge University Press, 2018. – Текст : непосредственный.

212 Van Oosterom, P. J. M. (Editor). Best Practices 3D Cadastres – Extended Version; International Federation of Surveyors (FIG) / P. J. M. Van Oosterom. – Copenhagen, Denmark, 2018. – Текст : непосредственный. – ISBN 978-87-92853-64-6. – ISSN 2311-8423.

213 Van Oosterom, P. Survey of Israel Three-Dimensional Cadastre and the ISO 19152: The Land Administration Domain Model. Tech. Rep. 1 (updated version) / P. van Oosterom. – 2014. – Текст : непосредственный.

214 Vučić, N. Examination of compatibility between the Croatian Land Administration System and LADM / N. Vučić, M. Roić, Z. Karović. – Текст : непосредственный // Developments in Multidimensional Spatial Data Models. Springer. – 2013. – P. 155–171.

215 Warsh, D. Knowledge and the Wealth of Nations: A Story of Economic Discovery / D. Warsh. – W. W. Norton & Company, 2007. – Текст : непосредственный.

216 Yong-kang, Chen. Технология построения земной поверхности с разными разрешениями на трехмерной визуализации географической особенности в ГИС/ Chen Yong-kang, Hu Yue-ming. – Текст : непосредственный // Nuaman pongye daxue xuebao, Ziran kexue ban = J.S. China Agr. Univ. Natur. Sci. Ed. – 2006. 4. – P. 102–105.

217 Zlatanova, S. Topological models and frameworks for 3D spatial objects / S. Zlatanova, A. A.Rahman, W. Shi. – Текст : непосредственный // *Comput. Geosci.* – 2004. – 30. – 419–428.

218 Zulkifli, N. A. 3D strata objects registration for Malaysia within the LADM framework / N. A. Zulkifli, A. Abdul Rahman, P. J. M. Van Oosterom. – Текст : непосредственный // *Proceedings 4th International Workshop on 3D Cadastres, 9–11 November 2014, Dubai, United Arab Emirates. International Federation of Surveyors (FIG).* – 2014.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА МЕТОДИКИ СБОРА И ОБРАБОТКИ
ТРЕХМЕРНЫХ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕДВИЖИМОСТИ
НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

