

Международный опыт планирования городского низковысотного воздушного пространства для беспилотных летательных аппаратов

LIU Quan, CHEN Yaoyao, HONG Xiaowei, LI Hao, QIAN Zhenghan

Аннотация. Развитие низковысотной экономики и городской воздушной мобильности стало одной из ключевых тем современного городского развития; в городах постепенно распространяются такие виды деятельности, как экспресс-доставка с использованием беспилотных летательных аппаратов. Эти процессы существенно изменяют структуру городского низковысотного воздушного пространства, повлияют на его безопасность, эффективность и пропускную способность, а также окажут значительное воздействие на форму, использование и управление городским пространством. Трехмерное развитие городов будущего больше не будет ограничиваться поверхностью земли, наземной застройкой и подземным уровнем: низковысотное воздушное пространство станет четвертым компонентом целостной пространственной структуры. Такая тенденция порождает новые задачи для градостроительства. Поэтому необходимо анализировать влияние развития беспилотных систем через взаимосвязь воздушного и городского пространства, обобщать международный опыт и системно исследовать методы планирования городского низковысотного воздушного пространства для беспилотных летательных аппаратов. Полученные выводы могут служить ориентиром для обновления градостроительного планирования в Китае.

Ключевые слова: умный город; низковысотная экономика; беспилотный летательный аппарат; городское пространство; воздушное пространство; трехмерный город; градостроительство.

Классификационный индекс Китайской библиотечной классификации: TU984. Код документа: A. DOI: 10.16361/j.urpf.202405009. Номер статьи: 1000-3363 (2024) 05-0064-07.

1 Развитие городского низковысотного воздушного пространства для БПЛА и его пространственные последствия

На протяжении длительного времени в образах города будущего небо, заполненное летательными аппаратами, выступало одним из главных символов технологического прогресса, а летающий автомобиль — одной из ключевых характеристик высокотехнологичного города [1]. К таким примерам относятся фантазии о дирижаблях над городом, опубликованные Boston Globe в 1900 г. [2]; изображения городских летательных аппаратов в «Современном городе» Ле Корбюзье и в Broadacre City Фрэнка Ллойда Райта в 1930-1940-е гг. [3]; а также предложенная в 2023 г. лабораторией NIKKEN Future Lab компании Nikken Sekkei модель AOD (air-mobility oriented development), включающая дроны и летающие автомобили [4]. В реальности технологии беспилотных летательных аппаратов (UAV, drones) и электрических аппаратов вертикального взлета и посадки (eVTOL) становятся все более зрелыми и уже оказывают практическое влияние на городское воздушное и наземное пространство.

В Китае развитие низковысотной авиационной техники вызывает заметные изменения в городском воздушном пространстве и способствует быстрому росту низковысотной экономики^①. В 2021 г. Центральный комитет КПК и Государственный совет опубликовали «Национальную схему комплексной трехмерной транспортной сети», впервые включив понятие «низковысотная экономика» в документ общегосударственного планирования. В 2023 г. к ней стало привлекаться еще больше внимания как к новому опорному сектору с потенциальным объемом в триллионы юаней.

С точки зрения градостроительного планирования и строительства летательные аппараты, используемые в городе, преимущественно находятся в низковысотном воздушном пространстве. В

отличие от авиации общего назначения, выполняющей полеты на большей высоте, эти аппараты теснее связаны с повседневной деятельностью населения и ближе к застроенной среде. В городах постепенно возникают доставка и логистика с использованием дронов, что меняет безопасность, эффективность и пропускную способность низковысотного пространства и существенно влияет на форму, использование и управление городскими территориями.

В период становления современного градостроительства автомобиль рассматривался как центральный элемент взаимосвязи землепользования и транспорта [5]. Подобно тому как изобретение автомобиля преобразовало современное градостроительство, а технологии беспилотных автомобилей меняют действующую транспортную систему [6], развитие низковысотной экономики и зрелость беспилотных технологий способны существенно повлиять на пространственную морфологию умного города.

В условиях быстрого развития беспилотных систем трехмерная структура будущего города перестанет ограничиваться землей, наземной застройкой и подземным пространством. Низковысотное воздушное пространство станет четвертым уровнем и дополнит общую пространственную систему. В отличие от eVTOL, которые обычно эксплуатируются выше 120 м, дроны преимущественно летают ниже этой высоты [7], то есть ближе к поверхности. Поэтому именно они могут оказывать наиболее непосредственное влияние на отношения между наземным пространством и низковысотным воздушным слоем в планировании умных городов.

Следовательно, необходимо исследовать значение развития беспилотных систем через взаимосвязь воздушного и городского пространства, обобщить отечественный и международный опыт и выполнить обзор методов планирования городского низковысотного воздушного пространства для БПЛА^②. Это позволит предложить ориентиры для совершенствования управления низковысотным пространством и градостроительного планирования в Китае.

2 Городское низковысотное воздушное пространство

2.1 Определение городского низковысотного воздушного пространства

По мере развития низковысотной экономики городская воздушная мобильность (urban air mobility, UAM) становится важной тенденцией. Беспилотники применяются в перевозках, пожарном надзоре, предупреждении бедствий, картографии и других сферах и становятся приоритетным направлением для многих стран. Их распространение неизбежно меняет способы использования воздушного пространства.

Понятие «воздушное пространство» тесно связано с летательными аппаратами и обычно обозначает объем воздуха над земной поверхностью, пригодный для полетов. В соответствии с требованиями Международной организации гражданской авиации (ICAO) к обслуживанию воздушного движения и полетам оно подразделяется на контролируемое и неконтролируемое и включает семь классов — A, B, C, D, E, F и G. Классы A-E являются контролируемыми, а F и G — неконтролируемыми [8].

В принципе к низковысотному воздушному пространству относится пространство с истинной высотой до 1000 м включительно [9]. Сверхнизковысотным обычно считается пространство до 120 м включительно, относящееся к неконтролируемому классу G^③. По данным Управления гражданской авиации Китая за первый квартал 2019 г., 96,5 % беспилотников эксплуатировались ниже верхней границы сверхнизковысотного пространства, а 99,9 % — ниже верхней границы низковысотного. Таким образом, низковысотное воздушное пространство непосредственно связано с полетами БПЛА.

Опубликованные в Китае в 2024 г. «Временные правила управления полетами беспилотных воздушных судов» определяют пространство ниже 120 м как пригодное для полетов беспилотников, тогда как высоты выше 120 м относятся к контролируемому пространству [10]④. Поэтому настоящее исследование сосредоточено на городском воздушном пространстве ниже 120 м, используемом главным образом двумя категориями аппаратов: потребительскими дронами и небольшими логистическими БПЛА.

Рост использования беспилотников означает более интенсивное освоение городского низковысотного пространства и ставит вопрос о его управлении [11]. Ранее эта часть воздушной среды почти не учитывалась ни в управлении воздушным движением, ни в градостроительстве. В условиях развития умных городов она становится важным пространственным ресурсом и одновременно зоной потенциальных конфликтов управления. Пол Кьюртон отмечает, что городская воздушная мобильность дополняет ранее малоиспользуемый «пустой слой» (void space) между традиционной авиацией и земной поверхностью [2].

2.2 Взаимосвязь воздушного и городского пространства и связанные с ней проблемы

Поскольку низковысотное воздушное пространство находится в пределах города, оно непосредственно связано с понятием городского пространства. Для его определения необходимо разграничить эти две основные категории. В городе пространство и пространственные права имеют сравнительно ясное содержание и правовое закрепление. В отличие от них действующее китайское законодательство не раскрывает в достаточной мере содержание понятия воздушного пространства [12] и недостаточно четко определяет воздушные права [9, 13].

Сложность заключается в том, что воздушное пространство нельзя описывать чрезмерно широко: речь идет именно о пространстве, в котором воздушное судно теоретически может безопасно выполнять полет [9]. При этом различие между низковысотным воздушным пространством и надземным городским пространством, рассматриваемым градостроительством, до сих пор остается не вполне определенным.

Эксплуатация дронов в городском низковысотном пространстве непосредственно влияет на застроенную среду и меняет отношения на границе между воздушным движением и городом. Это затрагивает пассажирские перевозки, доставку медицинских грузов, экспресс-логистику, аварийно-спасательные службы и обслуживание инфраструктуры [11]. С ростом числа дронов низковысотное пространство все отчетливее проявляет свойства пространственного ресурса. Поскольку нормативные акты не всегда устанавливают минимальную высоту полета, в приземном слое воздушные и пространственные права частично перекрываются. Применение БПЛА в городе «разрушает буфер прав между воздушным пространством и существующими правами на землю, сложившийся в эпоху пилотируемой авиации» [13]. По мере увеличения трафика сложность управления воздухом и городским пространством будет возрастать [10].

2.3 Содержание планирования городского низковысотного воздушного пространства

Планирование воздушного пространства тесно связано с управлением и контролем воздушного движения. Оно представляет собой стратегическую организацию системы управления трафиком и распределение ресурсов воздушного пространства с целью обеспечения безопасности и эффективности [14]. Планирование пространства авиации общего назначения уже включает проектирование процедур, формирование структуры воздушного пространства, распределение ответственности за обслуживание воздушного движения и определение классов зон обслуживания

[15]. Освоение городского низковысотного пространства находится, однако, лишь на начальном этапе и пока не достигло подобной зрелости.

Чжан Хунхай и др. [16], а также Ли Чэнлун и др. [17] считают, что планирование должно охватывать три направления: зонирование, структуру и пропускную способность воздушного пространства. На нынешнем этапе беспилотная авиация развивается преимущественно через пилотные демонстрационные операции в типовых условиях, поэтому планирование сосредоточено на конкретных маршрутах. На зрелой стадии, с резким увеличением интенсивности движения, приоритетными станут зонирование и структура, а безопасные, справедливые и эффективные маршруты для каждого аппарата будут проектироваться автоматизированными системами планирования полетов [18].

3 Обзор международного опыта планирования городского низковысотного воздушного пространства

Проектирование структуры городского воздушного пространства тесно связано с режимом полета беспилотников. Согласно схеме Airbus, можно выделить четыре режима: базовый полет (basic flight), свободный маршрут (free route), коридор (corridor) и смешанный маршрут (mixed route). Базовый режим представляет обычный полет аппарата; свободный маршрут допускает движение по любой траектории при согласовании с траекториями других аппаратов и отсутствии конфликтов; коридор — это выделенное пространство для управления участками повышенного спроса или концентрированными потоками; смешанный режим предусматривает фиксированные маршруты и связанные объекты в условиях высокой плотности трафика или в местах, где структурирование необходимо для безопасности [19] (рис. 1).

С учетом характеристик полетов городское воздушное пространство можно организовать по четырем основным моделям: полностью смешанной, послышной, зональной и коридорной. Они различаются степенью свободы по направлению, высоте и скорости [20-21] (рис. 2). Ниже международный опыт рассматривается по трем аспектам: зонирование, структура и пропускная способность.

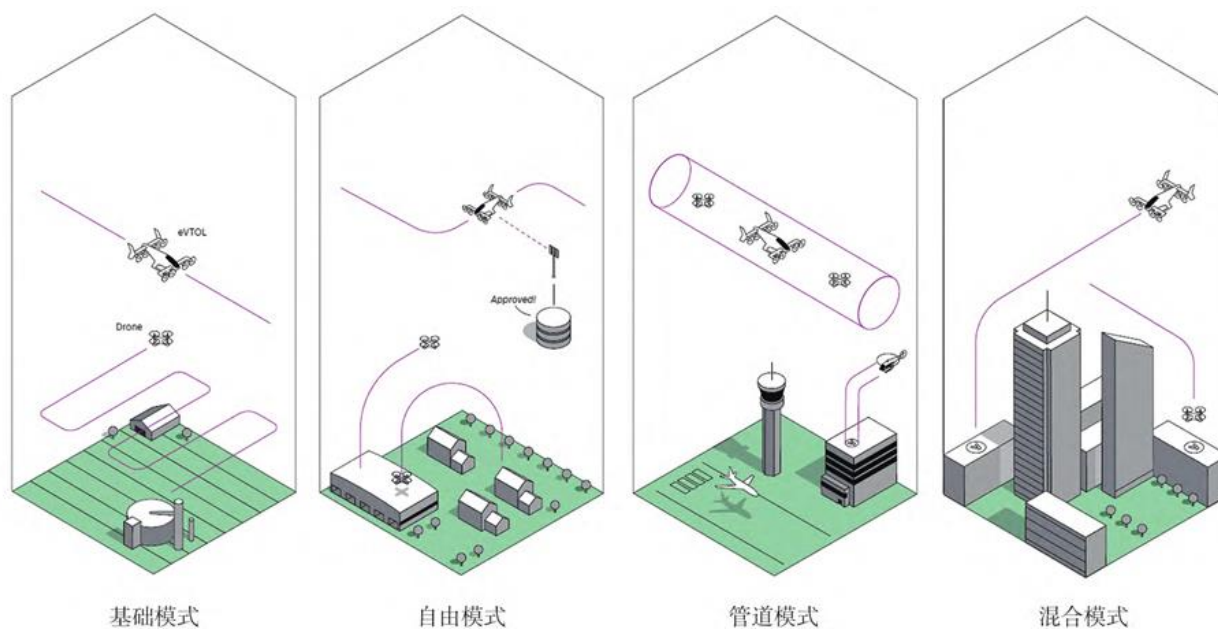


Рисунок 1. Четыре режима полета беспилотных летательных аппаратов [19]

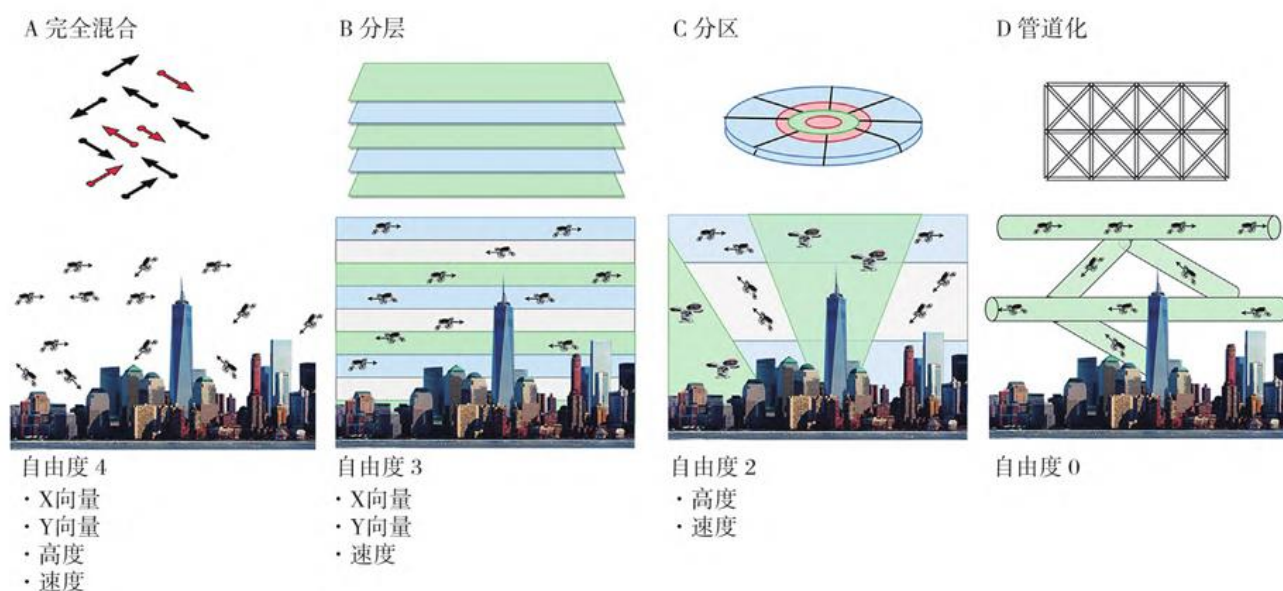


Рисунок 2. Четыре концепции структуры воздушного пространства [21]

3.1 Зонирование и эшелонирование низковысотного воздушного пространства

Некоторые страны, города и организации уже приступили к исследованиям и практическим экспериментам по послойному и зональному управлению низковысотным воздушным пространством. Федеральное управление гражданской авиации США (FAA), опираясь на классификацию ICAO, рассматривает неконтролируемое сверхнизковысотное пространство от земли до 120 м как зону полетов малых БПЛА. Программа управления беспилотным движением FAA и NASA стремится интегрировать операции дронов с другими классами воздушного пространства, создавая переходные зоны, резервирующие пространство для беспилотников и отделяющие их от контролируемого движения [8] (рис. 3).

Зонирование тесно связано с функциями полета и назначением наземных территорий. Зоны взлета и посадки и бесполетные зоны требуют специального выделения и управления. Городские центры, обычные районы, сельская местность и территории вокруг аэропортов предъявляют различные требования к полетам и имеют неодинаковый уровень риска. Эшелонирование, в свою очередь, должно учитывать современные технические характеристики беспилотников.

Компания Amazon, например, предлагает разделить низковысотное пространство над городом на несколько слоев: ниже 60 м — местная зона медленного движения для измерений, фото- и видеосъемки, инспекций и других неперевозочных операций, а также для менее совершенных аппаратов; от 60 до 120 м — зона высокоскоростного движения для технологически более развитых БПЛА; на высоте 120-150 м — бесполетная буферная зона; за пределами города — предварительно определенная зона низкого риска [22] (рис. 4).

При зонировании необходимо учитывать риск полетов и объекты, которых дроны должны избегать. Для потребительских аппаратов развлекательного назначения FAA запрещает полеты над скоплениями людей, транспортными потоками и ночью [23]. Обобщение геоэональных ограничений в разных странах показывает, что минимальные расстояния от людей, имущества, плотной застройки, зданий и инфраструктуры варьируют от 30 м до 5 км [24]. Кьюртон [3] выделяет четыре принципа: удаление от авиационных объектов, прежде всего аэропортов; расстояние более 150 м от городских

бесполетных зон; не менее 50 м от отдельных объектов; не менее 50 м от скоплений людей (рис. 5). Другие исследования предлагают защитные зоны радиусом 10-60 м для взлета, посадки и полета [25-26].

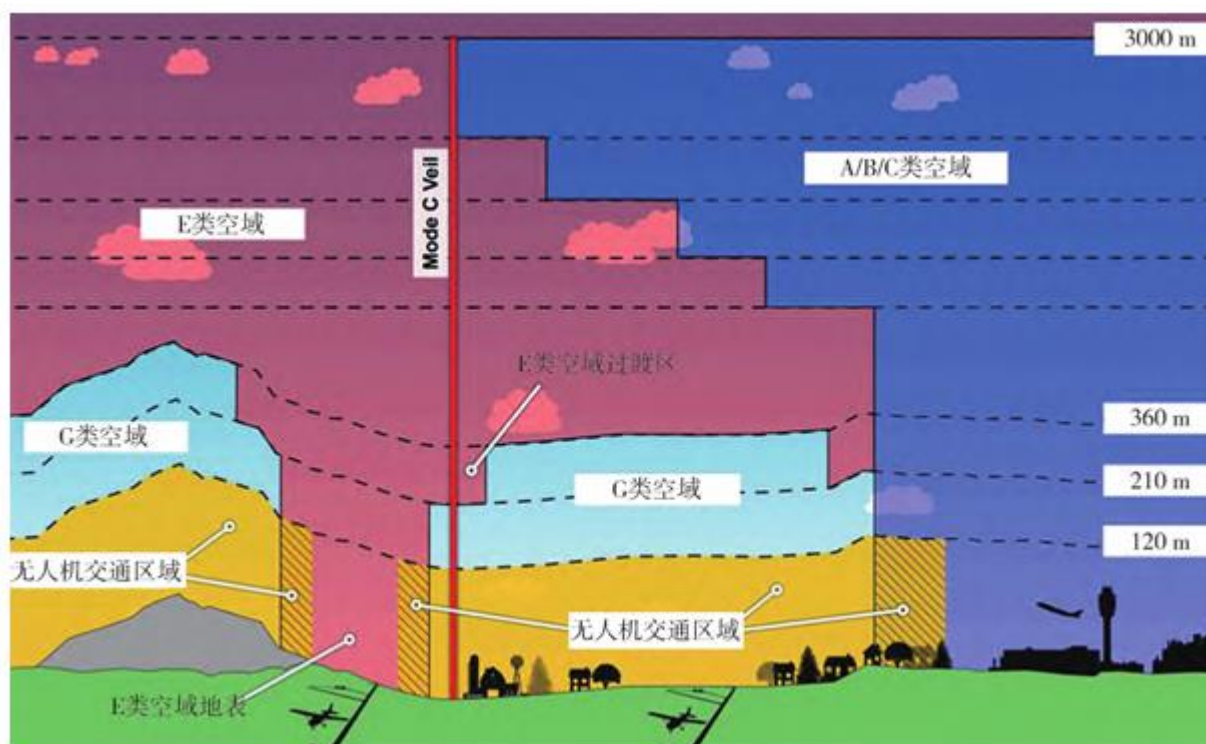


Рисунок 3. Зоны эксплуатации беспилотников в системе воздушного зонирования США [8]

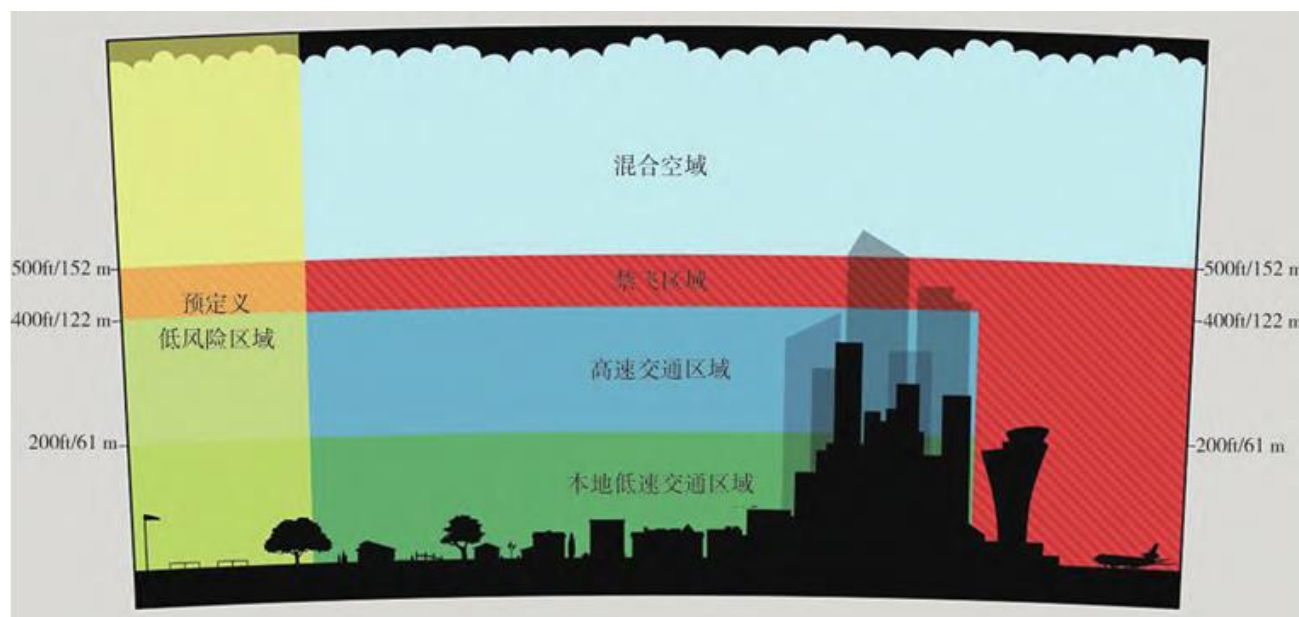


Рисунок 4. Предложенная Amazon схема эшелонирования и зонирования воздушного пространства для БПЛА [22]

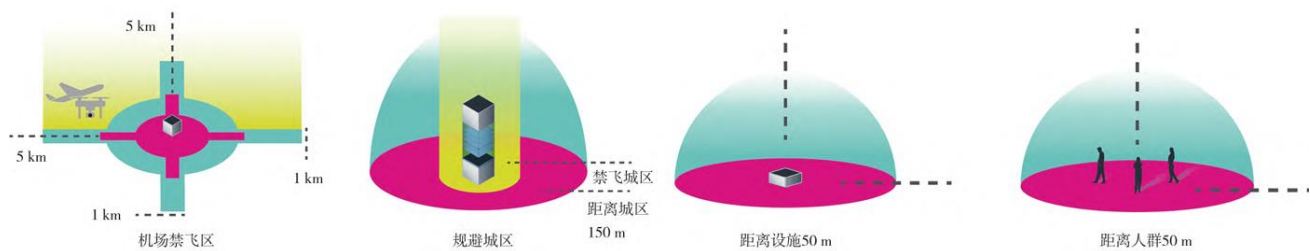


Рисунок 5. Люди и объекты, которых должны избегать беспилотники [3]

3.2 Проектирование структуры низковысотного воздушного пространства

С ростом количества БПЛА требуется более детальная структура движения в низковысотном пространстве, повышающая эффективность и обеспечивающая безопасность. NASA предлагает многоуровневую городскую структуру, где каждый слой формирует воздушную сеть над городом и между плотной высотной застройкой. Она включает воздушные полосы (sky-lane), воздушные трубы (sky-tube) и воздушные коридоры (sky-corridor), различающиеся числом степеней свободы. Sky-lane вводит максимальные ограничения по высоте, курсу, скорости и положению, тогда как sky-corridor допускает наибольшую свободу [8]. Структура может опираться на модель пространства класса G, показанную на рис. 6, и включать эшелонирование, а также горизонтальные, вертикальные и наклонные коридоры [27].

Ракеш Шрестха и др. рассматривают структуру воздушного пространства с позиции высокоскоростной связи 6G. Они предлагают послойную организацию и систему коридоров, соединенных с узлами в точках пересечения внутри слоев и между ними в горизонтальном, вертикальном и диагональном направлениях. Воздушные маршруты направляют движение БПЛА. Размер поперечного сечения определяется техническими характеристиками аппаратов, а длина — наличием статических препятствий, перекрестков и узлов на маршруте [28] (рис. 7).

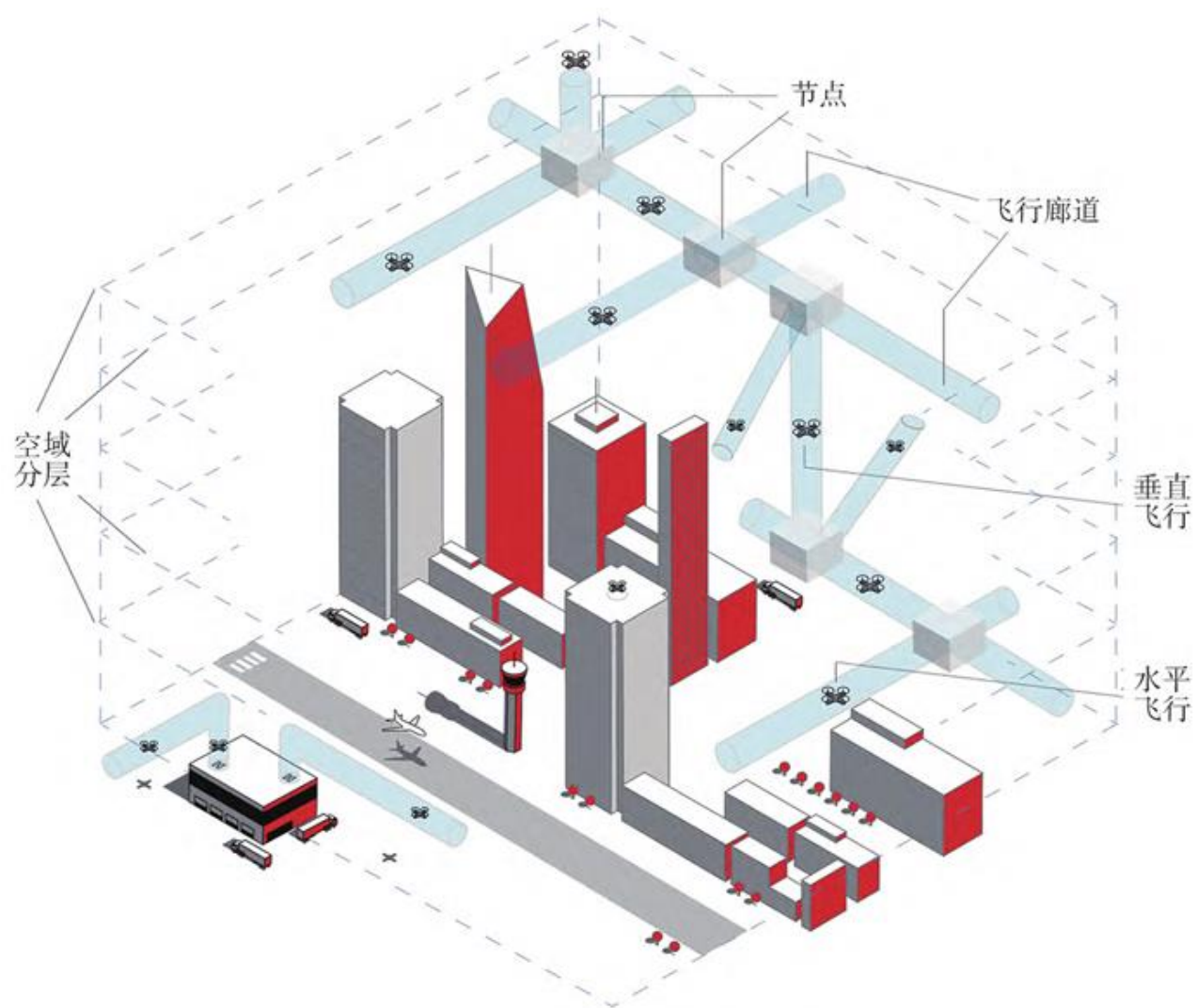


Рисунок 6. Проект структуры воздушного пространства класса G [27]

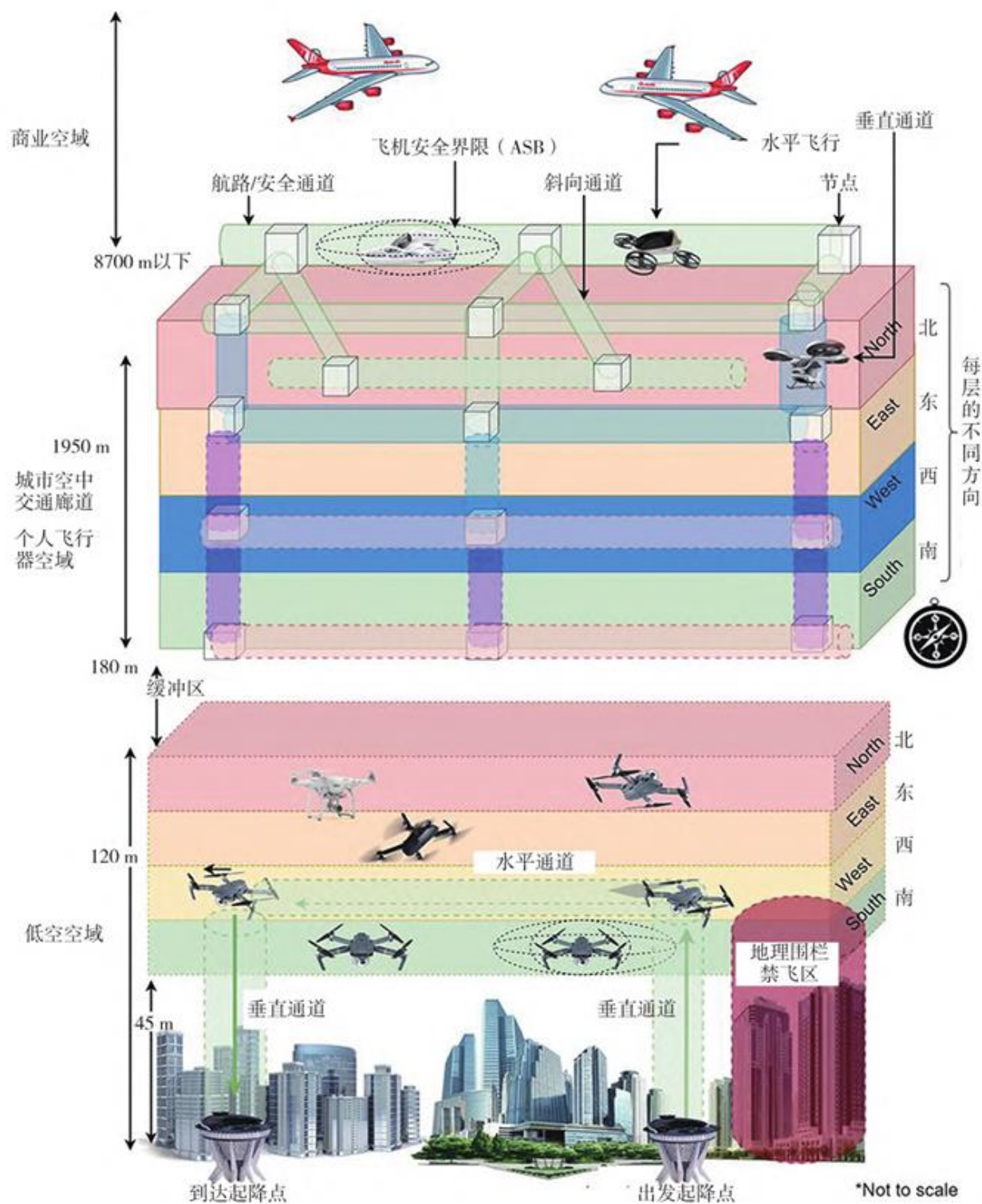


Рисунок 7. Модель структуры воздушного пространства, предложенная Шрестхой и др. [28]

3.3 Оценка и планирование пропускной способности низковысотного воздушного пространства

Пропускная способность воздушного пространства в принципе означает максимальное количество воздушных судов, которое может быть принято за единицу времени в конкретной среде. Различные типы структуры обеспечивают неодинаковую пропускную способность. По сравнению с

традиционным контролируемым высотным пространством, практически не содержащим статических препятствий, городская низковысотная среда значительно сложнее [29]. Пространственная организация города, интенсивность застройки и характеристики среды крайне неоднородны; здания высотой более 100 м и даже несколько сотен метров не редкость. Если верхняя граница полета БПЛА составляет 120 м, траектории неизбежно должны учитывать наземные сооружения и особенности окружающего пространства.

Поэтому исследования и пилотные практики обычно проектируют структуру и управление низковысотным пространством с учетом морфологии городской застройки. Они подчеркивают необходимость оценки пропускной способности, включающей сложность среды, характеристики летательных аппаратов и сценарии применения [30]. Делфтский технический университет предложил концепцию геовекторизации (geovectoring), повышающей пропускную способность за счет снижения сложности беспилотного трафика [20]. Наньянский технологический университет в Сингапуре оценивает городские сети воздушных маршрутов по двум показателям — емкости и пропускной способности. NASA выделяет периоды низкой, средней и высокой плотности и формулирует технические направления повышения емкости городского воздушного пространства [17].

Контроль емкости тесно связан с безопасностью. Для снижения риска столкновений планирование должно устанавливать максимальную плотность беспилотников в час на разных высотах [31]. Временными исключительными мерами могут быть расширение контролируемой зоны или создание изолированного пространства.

4 Перспективные подходы к планированию городского низковысотного воздушного пространства

Низковысотное воздушное пространство представляет собой неподвижный пространственный ресурс с выраженной зависимостью стоимости от местоположения. Чем выше плотность населения, тем больше спрос на его использование; в удаленных районах спрос ниже, что формирует различия в ценности [32]. По мере развития технологий и массового практического применения аппаратов использование городского низковысотного пространства становится все более напряженным. Это неизбежно приведет к его более детальному делению и переразметке и будет способствовать реконфигурации городского пространства с учетом воздушных функций.

Полноценное использование низковысотного пространства способствует формированию более целостной городской структуры, объединяющей материальные элементы и воздушную среду. В авиационной сфере накоплен значительный опыт эшелонирования и зонирования, однако градостроительная перспектива пока представлена недостаточно. Поэтому необходимо перспективно определить ключевое содержание методов планирования городского низковысотного пространства для беспилотников.

4.1 Комплексное планирование координации низковысотного воздушного и городского пространства

Проекты коридоров FAA и европейский исследовательский проект SESAR AMU-LED достаточно полно учитывают расположение маршрутов в городских центрах, пригородах, сельской местности и аэропортовых районах [33-34] (рис. 8, 9). Большинство схем отражает различия между центром, периферией и сельскими территориями [26, 33]. Они подчеркивают связь зонирования воздуха с планированием городской формы и значение элементов городской среды, однако управление пространством ниже 120 м для беспилотников пока разработано недостаточно.

С точки зрения градостроительства городскую морфологию можно описывать с помощью городско-сельского трансекта (urban-rural transect), применяемого в формоориентированных кодах

(form-based code) [35]. Планирование низковысотного воздушного пространства можно понимать как дополнение трансекта новым разделом регулирования, что позволяет создать общий пространственный каркас для воздушного зонирования и городского контроля.

С учетом различий городского местоположения можно исследовать новый метод, объединяющий требования зонирования воздушного пространства и управления наземной средой. Во-первых, градостроительные требования должны различаться для центра, обычных районов, периферии, сельской местности и аэропортовых зон; затем для каждой территории следует устанавливать высоты слоев, скорости, типы инфраструктуры и другие параметры. Во-вторых, планирование должно учитывать технические характеристики беспилотных систем, сценарии применения и требования к взлетно-посадочным, коммуникационным, зарядным и управляющим объектам, увязывая их размещение с типами городско-сельского трансекта. В-третьих, комплексное планирование должно учитывать риски для земли и воздуха и аварийные меры, чтобы через размещение инфраструктуры и управление емкостью снижать опасность столкновений и угрозу пешеходам и транспортным средствам.

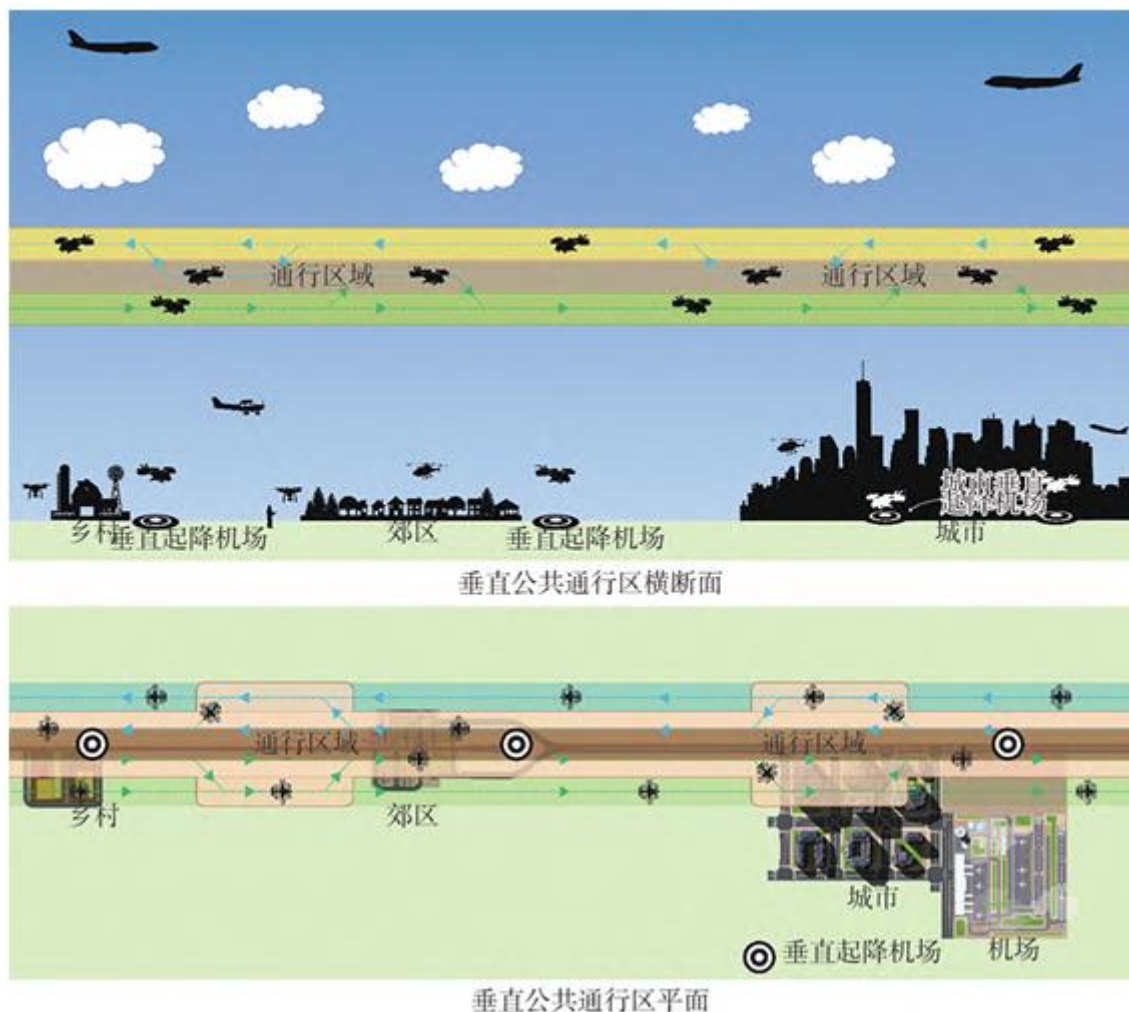


Рисунок 8. Проект коридоров для беспилотников Федерального управления гражданской авиации США [33]

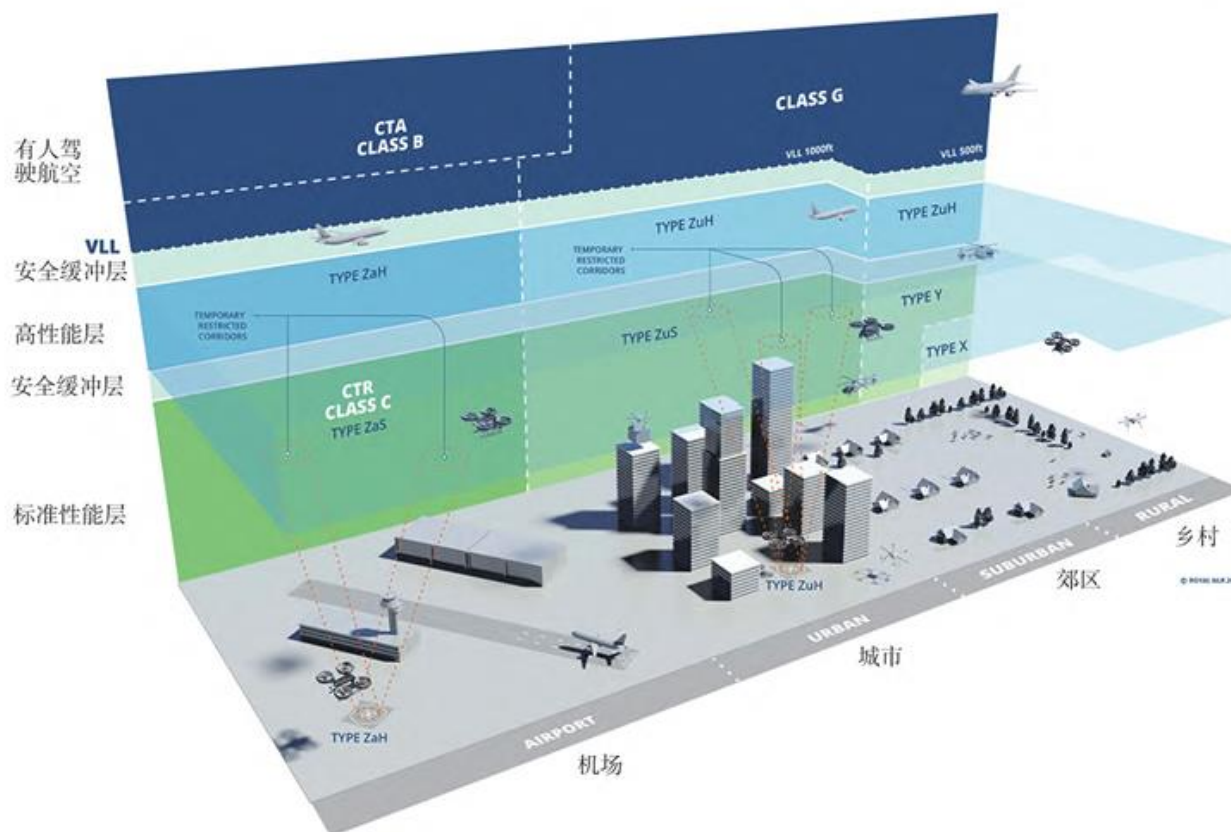


Рисунок 9. Зонирование воздушного пространства в проекте AMU-LED [34]

4.2 Структура, формируемая эшелонированием, зонированием и коридорами

Ключевой задачей проектирования является определение структуры воздушного пространства. Ее жесткость влияет на емкость, безопасность и эффективность. Слабо структурированная среда, например свободный маршрут на рис. 2, обеспечивает большую емкость и эффективность траекторий, но требует более совершенных технологий безопасности. Более жесткая структура, например коридорная, позволяет надежно эксплуатировать технически более простые аппараты, однако может снижать эффективность и увеличивать задержки [8, 29]. В целом предпочтительна максимально простая и надежная структура [8], способная безопасно принимать аппараты разного технического уровня и одновременно сохранять эффективность.

Обобщение исследований показывает, что с градостроительной точки зрения структура городского низковысотного пространства для беспилотников включает три компонента. Первый — эшелонирование по высоте, как в предложении Amazon, разделяющем высокоскоростную и местную медленную зоны. Второй — зонирование по типу воздушного пространства, функциям земли и характеристикам объектов с выделением разрешенных и бесполетных зон. Третий — проектирование вертикальных, горизонтальных и наклонных коридоров с определением их количества, местоположения и узлов. Например, в Шэньчжэне сервис доставки Meituan использует коридоры, каждый из которых утверждается отдельно.

4.3 Планирование размещения инфраструктуры для БПЛА

Малые беспилотники, пригодные для городского низковысотного пространства, разнообразны по характеристикам и размерам [28] и предъявляют разные требования к пространству, воздушной среде и инфраструктуре. Дроны Meituan при полном заряде обеспечивают доставку в радиусе 3 км за время не более 15 минут [36], тогда как Antwork формирует вокруг интеллектуальных логистических станций зоны обслуживания радиусом 10-15 км [37]. Масштаб обслуживания зависит от технических характеристик конкретного продукта.

Сопутствующая инфраструктура также различается. Требуется системное многоуровневое и категорийное планирование площадок взлета и посадки городских логистических дронов с учетом различных объемов спроса [38]. Во-первых, планирование должно связывать типы беспилотников с объектами взлета и посадки, связи, зарядки и управления и включать их в общую структуру воздушного пространства. Во-вторых, помимо транспортно-логистической инфраструктуры, необходимо учитывать аварийные объекты — наземные станции управления и площадки экстренной посадки.

4.4 Разработка механизмов и стандартов регулирования отношений между воздухом и землей

По мере распространения беспилотников ценность низковысотного пространства возрастает, и оно превращается из природного ресурса в экономический [35]. Однако нормативные акты не определяют нижнюю границу полетов, то есть насколько низко может опускаться аппарат. С точки зрения традиционного вещного права этот конфликт проявляется как ограничение пространственных прав воздушными правами [13].

Такая коллизия напоминает роль права автомобильного движения в городе и возможное сужение или расширение этого права под влиянием беспилотных автомобилей, многолетний конфликт публичных и частных прав в зонах отступа вдоль улиц, а также механизмы установления, поощрения и переноса коэффициента интенсивности застройки. Поэтому изменения взаимосвязи пространственных и воздушных прав требуют перспективного анализа.

Для разрешения низковысотных правовых конфликтов некоторые исследователи предлагают применять дуалистическую теорию собственности [20] и формировать воздушные права вокруг права использования общественного блага под государственным регулированием [9], превращая «право пользования воздушным пространством» в новый фактор производства, аналогичный праву землепользования [39]. В градостроительстве необходимо разрабатывать механизмы и стандарты управления правами на границе воздуха и земли. Во-первых, технические методы управления должны учитывать пространственные характеристики и различия стоимости разных функциональных зон. Во-вторых, в области пересечения публичной и частной собственности следует оценивать ценность низковысотного пространства над различными участками, исследовать соответствующие модели управления и проектировать механизмы по аналогии с регулированием интенсивности застройки и переносом прав развития.

5 Заключение

По своей природе ценность низковысотного воздушного пространства остается формой «земельной ренты», основанной на монопольном владении ресурсом [40]. Различия городского местоположения порождают различия пространственной стоимости и, следовательно, стоимости воздушного пространства, что в свою очередь будет менять ценность городской среды. В ответ на эту тенденцию планирование городского низковысотного пространства станет самостоятельным

инновационным направлением и будет стимулировать обновление пространственного планирования в целом.

Близость низковысотного воздушного пространства к наземной застроенной среде делает их координацию ключевой задачей. В разных городских зонах воздушное планирование будет все теснее связываться с планированием поверхности. Успешная реализация зависит от способности объединить принципы воздушного зонирования и пространственного контроля, рационально определить структуру и эффективно урегулировать отношения прав на границе воздуха и земли. В будущем градостроительство может двигаться к интеграции планирования воздушного и наземного пространства, что потребует сотрудничества специалистов в авиации, связи, градостроительстве и праве.

Примечания

- ① В настоящем исследовании основное внимание уделяется беспилотным летательным аппаратам.
- ② Используемое в статье понятие планирования низковысотного воздушного пространства заимствовано из авиационных исследований. В контексте UAM оно означает прежде всего планирование низковысотного движения, но также включает потребительские и другие функциональные виды беспилотников.
- ③ Пространство класса G — это пространство, расположенное вне классов B и C и вне класса W ниже истинной высоты 300 м; к нему также относятся зоны ниже 6 км над средним уровнем моря, не влияющие на общественные перевозки гражданской авиации. Класс B устанавливается над аэропортами гражданского транспорта. Класс C — над аэродромами авиации общего назначения с диспетчерской вышкой, обычно в виде кольца радиусом 5 км от поверхности ВПП до высоты 600 м над отметкой аэродрома включительно.
- ④ Значение 120 м получено переводом 400 футов и не является абсолютным. Некоторые европейские и японские стандарты устанавливают верхнюю границу низковысотного пространства на уровне 150 м, тогда как в Республике Корея максимальная высота полета беспилотников составляет 300 м; см. источник [21].

Литература

- [1] ABBOTT C. Города будущего: город в научной фантастике [M]. Пер. исследовательской группы по стратегиям развития глобальных городов Шанхайской академии общественных наук. Shanghai: Shanghai Academy of Social Sciences Press, 2018.
- [2] RATTI C, CLAUDEL M. Умный город [M]. Пер. ZHAO Lei. Beijing: CITIC Press Group, 2019.
- [3] CURETON P. Будущее дронов: беспилотные авиационные системы в ландшафтном и городском дизайне [M]. New York: Routledge, 2021.
- [4] SUGA Hiroyuki, WATANABE Shuichi, ONO Tatsuya, et al. Развитие, ориентированное на воздушную мобильность: город следующего поколения, ускоряющий наступление вдохновляющего будущего [EB/OL]. 2023-10-20 [2024-03-01].
- [5] NODJOMIAN A T, KOCKELMAN K. Как застроенная среда влияет на интерес к владению и использованию беспилотных автомобилей? [J]. Journal of Transport Geography, 2019, 78: 115-134.
- [6] GARROW L A, GERMAN B J, LEONARD C E. Городская воздушная мобильность: комплексный обзор и сравнительный анализ с автономным и электрическим наземным транспортом для определения

- направлений будущих исследований [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 132: 103377.
- [7] LIAO Xiaohan, QU Wenqiu, XU Chenchen, et al. Обзор городской воздушной мобильности и новой инфраструктуры низковысотных общественных воздушных маршрутов [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(24): 6-34.
- [8] BAURANOV A, RAKAS J. Проектирование воздушного пространства для городской воздушной мобильности: обзор концепций и подходов [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2021, 125: 100726.
- [9] WANG Lizhi. О правах на воздушное пространство: сравнительный анализ с пространственными правами [J]. *Science of Law (Journal of Northwest University of Political Science and Law)*, 2017, 35(4): 124-132.
- [10] State Council of the People's Republic of China. Временные правила управления полетами беспилотных воздушных судов [S/OL]. 2023-06-28 [2024-03-01].
- [11] NESTA. Высокий полет: будущее беспилотных технологий в городах Великобритании [R/OL]. 2018 [2024-03-01].
- [12] ZHANG Weibin, JIANG Hao. К вопросу о понятии воздушного пространства [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition)*, 2021, 34(3): 127-133.
- [13] JIANG Hao. Пути согласования прав на низковысотное воздушное пространство и пространственных прав [J]. *Journal of Zhengzhou University of Aeronautical Industry Management (Social Science Edition)*, 2020, 39(3): 23-31.
- [14] ZHANG Honghai, ZOU Yiyuan, ZHANG Qiqian, et al. Обзор будущего управления городской воздушной мобильностью [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(7): 82-106.
- [15] XIE Chunsheng, GUO Li, ZHANG Hong. Управление низковысотным воздушным пространством и планирование пространства авиации общего назначения [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016.
- [16] ZHANG Honghai, LI Shan, YI Jia, et al. Обзор планирования городских низковысотных воздушных маршрутов [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2021, 53(6): 827-838.
- [17] LI Chenglong, QU Wenqiu, LI Yandong, et al. Обзор управления городской воздушной транспортной системой для аппаратов eVTOL [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(4): 35-54.
- [18] TANG H L, ZHANG Y, MOHMOODIAN V, et al. Автоматизированное планирование полетов городской воздушной мобильности высокой плотности [J/OL]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 131: 103324.
- [19] BALAKRISHNAN K, POLASTRE J, MOOBERRY J, et al. Проект неба: дорожная карта безопасной интеграции автономных летательных аппаратов [R]. Toulouse: Airbus LLC, 2018.
- [20] НОЕКСТРА J M, ЕЛЛЕРБРОЕК J, СУНИЛ E, et al. Гео векторизация: снижение сложности движения для увеличения пропускной способности воздушного пространства БПЛА [C]// 2018 8th International Conference for Research in Air Transportation. Barcelona: ICRAT, 2018.
- [21] SHRESTHA R, ОН I, KIM S. Обзор концепций эксплуатации, достижений и проблем управления городским воздушным движением [J]. *Frontiers in Future Transportation*, 2021, 2: 626935.
- [22] AMAZON. Пересмотр модели воздушного пространства для безопасной интеграции малых беспилотных авиационных систем [R/OL]. 2015 [2024-02-04].
- [23] FAA. Общий обзор операций над людьми [ЕВ/ОЛ]. 2022-11-10 [2024-07-13].

- [24] XU C C, LIAO X H, TAN J M, et al. Современный прогресс исследований политики и технологий регулирования беспилотных летательных аппаратов в городском низковысотном пространстве [J]. IEEE Access, 2020, 8: 74175-74194.
- [25] CHEN Ming, HE Ning, HONG Chen, et al. Планирование маршрутов в управлении движением БПЛА на основе усовершенствованного иерархического кооперативного алгоритма A* [J/OL]. Computer Engineering and Applications, 2023-11-28 [2024-03-02]: 1-10.
- [26] OOSEDO A, HATTORI H, YASUI I, et al. Моделирование управления движением беспилотных авиационных систем для моделей доставки дронами в Японии в 2030 г. [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2021, 33(2): 348-362.
- [27] SAMIR L N, DANOY G, MUSIAL J, et al. Интернет беспилотных летательных аппаратов: многоуровневая модель низковысотного пространства для распределенного управления движением БПЛА [J]. Sensors, 2019, 19: 4779.
- [28] SHRESTHA R, BAJRACHARYA R, KIM S. Управление движением беспилотных летательных аппаратов с поддержкой 6G: перспективный подход [J]. IEEE Access, 2021, 9: 91119-91136.
- [29] CHO J, YOON Y. Как оценивать пропускную способность городского воздушного пространства: топологический подход с использованием геозон разрешенного и запрещенного доступа [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 92: 137-149.
- [30] ZHANG Honghai, YI Jia, LI Shan, et al. Обзор методов оценки пропускной способности низковысотного воздушного пространства [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 78-93.
- [31] BAI Long, LU Zi, DU Xinru, et al. Правила и методы выделения коридоров деятельности БПЛА в городском низко- и сверхнизковысотном воздушном пространстве [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(11): 1197-1204.
- [32] QIN Rui. Еще раз о низковысотной экономике (III): некоторые вопросы низковысотного воздушного пространства [EB/OL]. 2022-12-11 [2024-01-25].
- [33] FAA. Городская воздушная мобильность (UAM): концепция операций, версия 2.0 [R]. 2023.
- [34] SESAR Joint Undertaking. Демонстрация повседневных преимуществ U-space: первые результаты проектов SESAR (2020-2022) [R]. Luxembourg, 2022.
- [35] DUANY PLATER-ZYBERK & COMPANY. Библиотека изображений: городско-сельские трансекты [EB/OL]. 2008-03-28 [2024-02-10].
- [36] LIU Xiaopeng. Дроны Meituan для доставки на «последние три километра» [J]. China Logistics & Purchasing, 2022(18): 28-29.
- [37] WANG Yang. Antwork: развитие мгновенной доставки «дорога–воздух» — интервью с Yu Hang, соучредителем Hangzhou Antwork Network Technology Co., Ltd. [J]. Transportation Construction & Management, 2020(3): 118-123.
- [38] ZHANG Honghai, FENG Dikun, ZHANG Xiaowei, et al. Планирование размещения взлетно-посадочных площадок для городских логистических БПЛА [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(3): 207-214.
- [39] International Digital Economy Academy. Белая книга развития низковысотной экономики (2.0): полностью цифровое решение [R]. 2023.
- [40] LIAO Xiaohan, HUANG Yaohuan, XU Chenchen. Исследование ресурсов низковысотного воздушного пространства для применения беспилотников [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2607-2620.

Переработанная версия: август 2024 г.

Перевод выполнен с использованием ИИ