

Технологии зонирования низковысотного воздушного пространства и рамка управления его использованием на основе координации «воздух - земля»: территориально-пространственный подход

Авторы

Ань Ибинь, Сюй Сяоли, Дан Аньжун, Сунь Цзюху, Ли Сяньюй, Жун Юэцзин

Аннотация

На фоне быстрого развития низковысотной экономики и перехода к управлению территориальным пространством по принципу полного охвата и полного набора элементов низковысотное воздушное пространство все чаще рассматривается как новый тип трехмерного территориально-пространственного ресурса. Традиционное зонирование низковысотного воздушного пространства, однако, длительное время отдавало приоритет воздушным операциям и недооценивало функции наземного пространства, что затрудняет ответ на разнообразные низковысотные виды деятельности, включая логистическую доставку, аварийно-спасательные операции и пассажирские полеты. С позиции сопряжения систем «воздух - земля» статья обосновывает переход от маршрутного контроля к трехмерному пространственному управлению. В ней уточняются ресурсные свойства низковысотного воздушного пространства, раскрывается сопряжение между воздушным доступом и наземным использованием, формируется техническая система согласованного определения воздушных и наземных границ, а также предлагается рамка управления использованием, сочетающая функциональное зонирование и классификацию видов использования. На примере города Цзинань проверяются научная обоснованность и операционная применимость рамки. Исследование дает методическую поддержку и ориентиры для принятия решений по эффективному распределению низковысотных ресурсов и качественному развитию низковысотной экономики.

Ключевые слова

низковысотное воздушное пространство; технология зонирования; управление использованием; координация «воздух - земля»; использование низковысотных ресурсов

Введение

По мере того как экономическая трансформация Китая вступает в критическую фазу, низковысотная экономика становится новой промышленной формой и новым источником роста [1-2]. Быстро развиваются сценарии дроновой логистики, городской воздушной мобильности (UAM), низковысотного культурного туризма и других приложений; низковысотные полеты становятся более частыми, разнообразными и точными [3-8]. Одновременно привлекают внимание такие концепции, как vertical-oriented development (VOD), подчеркивающие согласованную организацию низковысотных транспортных сетей, объектов вертикального взлета и посадки и городского функционального пространства. Это предъявляет беспрецедентные требования к ресурсному предложению, способам организации и точности управления низковысотным воздушным пространством [9]. Будучи ключевым пространственным носителем низковысотной экономики, его планировочная структура, технологии зонирования и управление

использованием напрямую влияют на безопасность полетов и операционную эффективность, а также определяют качество и пределы масштабирования отрасли [10].

Традиционное зонирование низковысотного воздушного пространства восходит к логике авиационного управления. Оно сосредоточено на организации потоков воздушного движения и уделяет недостаточно внимания функциям наземной территории, экологической емкости и экспозиции риска. Такой подход, отдающий приоритет воздуху и ослабляющий внимание к земле, приводит к несоответствию воздушных и наземных элементов, конфликтам между полетной деятельностью и городской средой, а также к одновременному существованию локального дефицита предложения и неиспользуемых ресурсов [8]. По сравнению с быстро растущим спросом низковысотной экономики Китая национальная система управления низковысотным воздушным пространством все еще отстает как технологически, так и институционально. Основные ограничения сосредоточены в методах зонирования и механизмах управления использованием, которые пока не адаптированы к операционным требованиям новых форм деятельности [11-12].

Следовательно, необходимо обновить логику управления использованием низковысотного воздушного пространства и усилить координацию «воздух - земля». Это соответствует реформе Китая, направленной на территориально-пространственный контроль полного охвата и полного набора элементов [13-14], а также международным тенденциям низковысотного управления [15-16]. Координация «воздух - земля» по существу означает преодоление управленческих барьеров между зонированием воздушного пространства и управлением наземным пространством, а также между воздушными операциями и наземными регуляторными сервисами. Опираясь на управление природными ресурсами и «единую карту» территориально-пространственного планирования, она выявляет ключевые элементы низковысотной деятельности, наземных объектов, городских функций, рисков безопасности и правил управления. На этой основе исследование анализирует ограничения существующей литературы и строит интегрированную рамку технологий зонирования и управления использованием. Рамка обогащает теорию трехмерного территориально-пространственного управления и дает операционную методологию для более тонкой низковысотной воздушной политики.

1 Исследовательский прогресс в зонировании низковысотного воздушного пространства и управлении его использованием

1.1 Понятие и свойства низковысотного воздушного пространства

Низковысотное воздушное пространство является трехмерным территориально-пространственным ресурсом, глубоко зависящим от поверхностной среды и человеческой деятельности. Оно неструктурировано, сильно неоднородно и тесно связано с земной поверхностью [19-21]. Его дефицитность, емкостные ограничения и внешние эффекты риска означают, что развитие и использование должны с территориально-пространственной позиции согласовывать безопасность, эффективность и управленческие потребности [22-25]. Поэтому управление низковысотным воздушным пространством должно выйти за пределы разделения воздуха и земли. Контроль использования должен распространяться на трехмерное пространство через зонирование, нормативные ограничения и согласованное управление, чтобы точно соединяться с функциональным рисунком территориального пространства [26-29]. По мере роста низковысотной логистики, UAM и смежных отраслей экономическое свойство низковысотного

воздушного пространства как нового фактора производства становится все более выраженным. Его управленческая рамка должна способствовать эффективному распределению ресурсов и упорядоченному развитию низковысотной экономики при сохранении нижнего порога безопасности [30-36].

1.2 Эволюция технологий зонирования низковысотного воздушного пространства

Ранние подходы к зонированию низковысотного воздушного пространства в основном происходили из традиционного планирования авиационного воздушного пространства и исследований операционной безопасности. Основания зонирования концентрировались на реализуемости полета и обходе препятствий, включая организацию маршрутов или коридоров, очистку от препятствий, связность пунктов взлета и посадки и интервалы эшелонирования [15,19]. Такие операционно ориентированные методы эффективны для поддержания базового порядка воздушного пространства, но в плотной городской застройке, где параллельно и наложено происходят разные низковысотные активности, они часто сталкиваются с большими различиями наземной риск-экспозиции, высокой неоднородностью пространственных ограничений и недостаточной межрегиональной согласованностью. Итоговые схемы обычно имеют коридорный и фрагментированный характер и слабо описывают вертикальные различия.

С середины и конца 2010-х годов развитие систем UTM и U-space для масштабной эксплуатации дронов постепенно сформировало новую парадигму, в которой территориально-пространственные характеристики становятся предварительным условием. Международный опыт городского низковысотного планирования для БПЛА показывает, что США, европейские страны и Япония обычно включают в планирование градацию рисков, геоограждение, операционные сценарии, организацию маршрутов и цифровое регулирование [37]. В этом повороте зонирование уже не опирается только на летную реализуемость, обход препятствий и связность маршрутов. Оно также включает экспозицию населения, функции поверхности и чувствительные объекты, форму и высоту зданий, коридоры ключевой инфраструктуры и экологически чувствительные территории как базовые ограничения. Трехмерное зонирование выражается через сочетание вертикального слоения, организации коридоров и узлов и геозон. Геозоны становятся ключевым носителем цифровой публикации, поиска и обновления правил [38-39], переводя зонирование от простой оптимизации препятствий и связности к комплексному описанию сопряжения пространственного риска, характеристик поверхности и операционного спроса.

Разные юрисдикции сформировали различные траектории [15,30,40-44]. США скорее подчеркивают категориальную организацию и динамическое управление на широких масштабах. Европейский союз постепенно создает систему геозон и правил U-space для высокоплотных сложных сред. Япония делает акцент на согласовании технического и институционального продвижения городских низковысотных приложений с условиями городского пространства. В целом технологии зонирования низковысотного воздушного пространства переходят от логики воздушной операции, сосредоточенной на маршрутах и обходе препятствий, к логике территориального пространства, сосредоточенной на геозонах и трехмерных интегрированных ограничениях.

Таблица 1. Сравнение принципов зонирования низковысотного воздушного пространства и моделей классификации

Страна или регион	Базовый принцип зонирования	Логика классификации воздушного пространства	Основные элементы зонирования
США	Безопасность прежде всего; открытость и эффективность	Следует классам ICAO/FAA A-G; на низких высотах в основном используется Class G	Существующие классы и контролируемое аэропортовое пространство задают каркас, с динамическим зонированием
Европейский союз	Ориентация на риск; координация воздуха и земли	Геозоны U-space как ядро; доступ по наложенным рискам	Иерархическое управление геозонами в сочетании с маршрутными коридорами
Япония	Приоритет городской безопасности; интеграция воздуха и земли	Следует логике ICAO и фокусируется на специальных сценариях AAM	Интегрированная организация маршрутных коридоров, вертипортов и операционных зон
Канада	Ясные правила; ориентация на ответственность	Использует систему классов ICAO A-G	Классы воздушного пространства как основа, с запретными и ограниченными зонами по риску
Австралия	Градация риска; упрощение правил	Следует классификационной логике ICAO	На основе географических ограничений и условий эксплуатации, без сложной реконструкции
Великобритания	Безопасность и инновации; постепенное зонирование	На основе контролируемого и неконтролируемого воздушного пространства, с	Class G как ядро, продвижение инженерной организации коридоров и узлов

		увязкой с U-space	
--	--	-------------------	--

1.3 Прогресс в управлении использованием и планировочной увязке

В условиях управления полным охватом и полным набором элементов научная связь между управлением использованием низковысотного воздушного пространства и территориально-пространственным планированием является ключом к разрешению конфликтов низковысотных ресурсов. Международно текущие формы связи между управлением использованием и планированием можно разделить на три режима: рыночное направление, технологическое усиление и административное регулирование. США преимущественно используют рыночное направление для адаптации низковысотных ресурсов к спросу [30]. Япония больше опирается на полетные сценарии и технологическую адаптацию. Европейские страны соединяют регуляторные рамки с рыночным надзором. Канада, Австралия и Великобритания подчеркивают территориальную безопасность, хотя чрезмерная ориентация на безопасность может сдерживать инновации. Несмотря на широкое распространение этих систем, управление использованием низковысотного воздушного пространства все еще характеризуется слабой координацией «воздух - земля», недостаточностью механизмов балансирования целей и ограниченной связью между воздушным и наземным управлением.

Китай также начал накапливать локальный опыт контроля низковысотного пространственного использования. Сосредоточившись на совместном управлении территориальным пространством и низковысотным воздушным пространством, он пытается распространить опыт территориально-пространственного контроля на низковысотную сферу. Первоначально сформировался механизм, в котором центральный уровень задает общую институциональную рамку, а местные власти уточняют правила реализации, сочетая единство системы с локальной адаптацией. Современные работы все больше подчеркивают выявление воздушных и наземных элементов, соответствие операционным сценариям, размещение сетей объектов и планировочные ответы в городском низковысотном планировании [18]. Они также используют оценку несущей способности, идентификацию ограниченных территорий и расчеты на основе слияния многоисточниковых данных для повышения научности управления [25,45]. Технический прогресс в планировании маршрутов БПЛА, интегрированной связи и сенсорике (ISAC) и совместном управлении ресурсами дополнительно поддерживает организацию маршрутов, распределение воздушного пространства и согласованный контроль воздуха и земли [46].

Тем не менее сохраняются существенные слабости. В реализации не до конца прояснены границы прав и обязанностей между воздушным управлением и наземным контролем. Согласно руководящим мнениям Госсовета о развитии авиации общего назначения, управление низковысотным воздушным пространством требует согласования военной и гражданской авиации, местных властей и профильных ведомств; однако в некоторых районах еще не созданы эффективные межведомственные механизмы, что приводит к разрыву между управлением воздушным пространством, размещением инфраструктуры и реализацией проектов. Институционально управление низковысотным воздушным пространством недостаточно интегрировано с наземными требованиями обхода специальных функциональных зон и типичных препятствий. Существующие методы все еще не включают наземные пространственные границы в процесс зонирования воздушного пространства в достаточной мере, поэтому не могут полностью

поддержать тонкое распределение и эффективное использование низковысотных ресурсов в межрегиональных и межотраслевых сценариях.

Таблица 2. Сравнение систем управления использованием низковысотного воздушного пространства

Страна или регион	Основные законы или политики	Регулятор	Управленческая ориентация
США	Federal Aviation Act (1958); Part 107 small UAS rule (2016); Advanced Air Mobility Coordination and Leadership Act (2022)	Federal Aviation Administration (FAA)	Рыночное направление и динамические операционные правила
Европейский союз	EU drone regulation (2019); U-space regulatory framework (2023)	European Union Aviation Safety Agency (EASA) и национальные авиационные органы (NAA)	Геозональный контроль рисков и цифровая публикация правил
Япония	Aviation Act (2022); Advanced Air Mobility roadmap (2018)	Japan Civil Aviation Bureau (JCAB)	Сценарная городская безопасность и координация ААМ
Канада	Aeronautics Act (1985); Canadian Aviation Regulations Part IX for drones (2019)	Transport Canada	Четкие операционные обязанности и соблюдение безопасности
Австралия	Civil Aviation Safety Regulations Part 101 for drones (2002); Airspace Act (2007)	Civil Aviation Safety Authority (CASA)	Риск-градуированный контроль и упрощенные правила
Великобритания	Air Navigation Order (2016)	Civil Aviation Authority (CAA)	Постепенное управление, связывающее контролируемое воздушное пространство с U-space

2 Низковысотное воздушное пространство в условиях сопряжения систем «воздух - земля»

2.1 Определение свойств: низковысотное воздушное пространство как территориально-пространственный ресурс

Низковысотное воздушное пространство отличается от земельных ресурсов, которые могут полностью распределяться рыночными механизмами, и от запретных для полетов пространств,

подлежащих чисто административному контролю. Это квазипубличный пространственный ресурс, требующий динамического баланса между общественным интересом и операционной эффективностью. Поэтому теоретическая предпосылка его зонирования должна перейти от традиционной классификации воздушного пространства к выражению пространства как ресурса. Через уточнение пространственных границ, правовых свойств, распределения прав развития, доступа к использованию, распределения выгод и ограничений общественной безопасности низковысотное воздушное пространство может стать трехмерным ресурсом, который можно идентифицировать, измерять, распределять и включать в систему планировочного управления [36]. Этот перевод от «пространства полета» к «пространственному ресурсу» формирует базовую логику интегрированного зонирования «воздух - земля».

2.2 Механизм сопряжения: взаимодействие территориального пространства и низковысотных ресурсов

С точки зрения целостности пространственной системы территориальное пространство и низковысотные ресурсы образуют вертикально вложенную и взаимно ограничивающую систему пространственного сопряжения. Их взаимодействие проявляется в трех механизмах: фоновое пространственное ограничение, функциональная адаптация и согласованная передача риска. Политически и военно чувствительные зоны, рельеф и геоморфология, высотный профиль застройки и другие ключевые элементы территориального пространства напрямую определяют используемый диапазон и операционные пороги низковысотного воздушного пространства, образуя жесткие ограничения развития ресурсов. В обратном направлении пространственная концентрация низковысотных инспекций, воздушной логистики, UAM и других активностей направляет размещение наземных узлов взлета и посадки, обеспечивающих объектов и сервисных сетей, продвигая использование территориального пространства к трехмерному расширению.

Глубокое сопряжение функции и риска означает, что зонирование низковысотного воздушного пространства должно соединяться с территориально-пространственным контролем использования. Наземное функциональное зонирование определяет интенсивность низковысотного использования и уровень контроля. Плотные населенные районы, экологически чувствительные зоны и другие пространственные единицы соответствуют дифференцированным правилам доступа и порогам безопасности. Одновременно риски безопасности и экологические внешние эффекты низковысотных полетов напрямую воздействуют на общественные интересы поверхности. Поэтому сопряжение «воздух - земля» является не только физической вложенностью пространства, но и институциональным сопряжением планировочной логики, правил контроля и управленческих обязанностей. Оно дает внутреннее основание для реконструкции теории зонирования низковысотного воздушного пространства.

Полный охват и полный набор элементов территориально-пространственного планирования дают базовую платформу для управления низковысотными ресурсами. Существующие платформы управления низковысотными полетными операциями уже демонстрируют начальную форму трехмерного управления, но им все еще необходимо опираться на территориально-пространственное планирование как ведущую рамку, чтобы достичь глубокой координации воздушного и наземного контроля и увязки правил. Теоретическое построение управления низковысотными ресурсами в территориально-пространственной перспективе должно опираться

на рамку территориально-пространственного планировочного контроля, соединять систему управления низковысотным воздушным пространством, раскрывать двусторонний механизм, через который наземные условия формируют воздушное пространство, а воздушные операции воздействуют обратно на наземное использование, и поддерживать согласованное распределение территориальных и низковысотных ресурсов.

3 Технологии зонирования низковысотного воздушного пространства и рамка управления использованием в территориально-пространственной перспективе

3.1 Построение рамки: от распознавания элементов к интегрированному зонированию «воздух - земля»

Координация «воздух - земля» выходит за пределы односторонней логики, в которой наземные препятствия лишь ограничивают полеты. Она подчеркивает динамическое сопряжение. С одной стороны, наземные функции, плотность населения и форма застройки определяют уровень риска и условия доступа в низковысотное воздушное пространство. С другой стороны, зонирование воздушных маршрутов и операционных зон предъявляет обратные требования к размещению взлетно-посадочных объектов, шумочувствительных точек и обеспечивающей инфраструктуры.

С точки зрения пространственного механизма пригодность низковысотного воздушного пространства зависит не только от воздушных операционных условий, но и глубоко формируется наземной пространственной структурой. Городская функциональная форма, инфраструктурные коридоры, экологические ограничения и чувствительные объекты совместно определяют используемый диапазон и операционные риски. Через наложение воздушных и наземных элементов они влияют на доступность, безопасность и эффективность. Поэтому интегрированное зонирование «воздух - земля» должно описывать взаимодействие в трехмерной городской пространственной рамке, а не рассматривать наземное пространство только как пассивный набор ограничений. Функционально низковысотные активности в основном обслуживают наземные городские функции и должны соответствовать наземному функциональному зонированию. В управлении низковысотное воздушное пространство требует совместного участия нескольких ведомств; координация должна использовать единые пространственные единицы и правила для соединения операционного управления с управлением использованием, снижая институциональные трения.

Статья предлагает комплексную рамку, включающую ограничения низковысотного воздушного пространства, технологии зонирования, принципы зонирования, определение воздушных и наземных границ, интегрированное зонирование «воздух - земля» и управление использованием с динамической оптимизацией (рисунок 1). Рамка основана на управлении полным охватом и рассматривает безопасность, экологическую защиту и эффективное распределение ресурсов как взаимосвязанные требования.

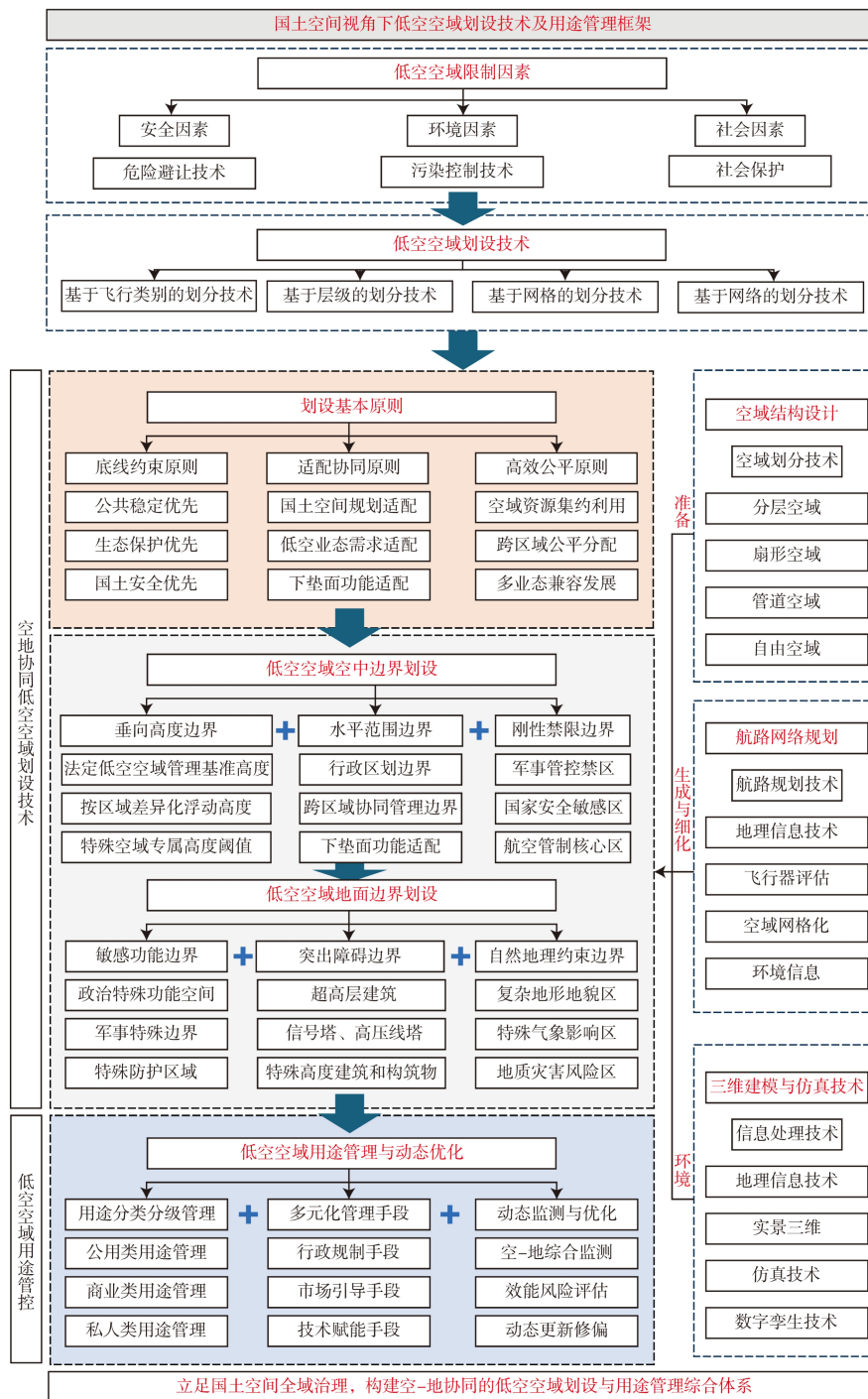


Рисунок 1. Система зонирования низковысотного воздушного пространства и управления использованием на основе координации «воздух - земля»

3.2 Базовые принципы зонирования

Предлагаемая рамка следует трем базовым принципам. Во-первых, принцип нижнего предела ограничений отдает приоритет общественной стабильности, экологической защите и национальной территориальной безопасности. Зоны военного контроля, чувствительные зоны национальной безопасности, ядра авиационного контроля и другие жесткие ограничения должны

исключаться или строго контролироваться. Во-вторых, принцип адаптации и координации требует соответствия низковысотного воздушного пространства территориально-пространственному планированию, потребностям низковысотных бизнес-форм и функциям подстилающей поверхности. В-третьих, принцип эффективности и справедливости подчеркивает интенсивное использование воздушного пространства, межрегиональное справедливое распределение и совместимость нескольких отраслей. Эти принципы позволяют зонированию балансировать общественную безопасность, операционный спрос и ресурсную эффективность.

3.3 Технология интегрированного зонирования «воздух - земля»

3.3.1 Определение воздушных границ

Определение воздушных границ включает вертикальные высотные границы, горизонтальные границы охвата и жесткие запретные или ограничительные границы. В вертикальном измерении нормативная базовая высота управления низковысотным воздушным пространством должна сочетаться с регионально дифференцированными плавающими высотами и специальными высотными порогами для отдельных воздушных пространств. На практике низковысотное пространство может делиться по истинной высоте на несколько слоев, например сверхнизкий, низкий и средне-низкий операционные слои, соответствующие операциям малых дронов, зонам управления легкими дронами и зонам интеграции авиации общего назначения.

В горизонтальном измерении высокоточные географические данные и реалистичные трехмерные данные должны заменить традиционную модель маршрута «точка - точка». Трехмерная сеточная технология позволяет вокселизировать воздушное пространство, рассчитывать оболочки просвета зданий и зоны безопасного разделения, а также формировать цифровые геоограждения. Фиксированные и временные воздушные пространства должны сочетаться в соответствии со сценариями полета. Временное пространство может определяться в заданных временных окнах для низковысотного туризма, аварийно-спасательных операций и других динамических активностей. Через интеграцию реалистичного 3D-моделирования, анализа препятствий, анализа высоты полета и обхода конфликтов воздушные границы могут выражаться как точные и обновляемые пространственные единицы.

3.3.2 Определение наземных границ

Определение наземных границ включает чувствительные функциональные границы, границы выраженных препятствий и природно-географические ограничительные границы. Чувствительные функциональные границы включают политические и военные специальные пространства, специальные защитные зоны и зоны обхода общественной инфраструктуры. Границы выраженных препятствий включают высотные здания, сигнальные башни, опоры высоковольтных линий и здания или сооружения особой высоты. Природно-географические ограничения включают сложный рельеф и геоморфологию, территории с особыми метеорологическими воздействиями и зоны риска геологических бедствий. Такое определение переводит наземные риски в пространственные ограничения для низковысотного воздушного пространства и дает основу для дифференциации условий доступа и интенсивности операций.

3.3.3 Интегрированное зонирование «воздух - земля»

Интегрированное зонирование соединяет воздушное слоение с наземным зонированием. Рабочий процесс включает выявление ограничений, интеграцию оценочных данных, построение 3D-моделей, отбор чувствительных зон и включение данных территориально-пространственного

обследования и рельефно-геоморфологических данных. Он должен учитывать различия функций подстилающей поверхности между городскими, сельскими и экологическими территориями. Результатом становится многоуровневая система зонирования, связывающая воздушные границы, наземные границы и ограничения сопряжения «воздух - земля», что обеспечивает пространственную поддержку качественному развитию низковысотной экономики (рисунок 2).

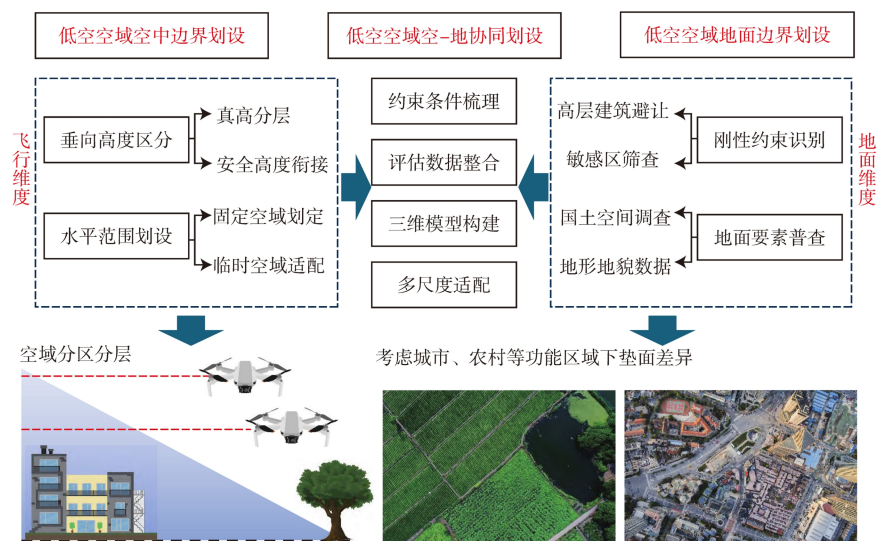


Рисунок 2. Техническая рамка зонирования низковысотного воздушного пространства в территориально-пространственной перспективе

3.4 Институциональный дизайн управления использованием на основе координации «воздух - земля»

3.4.1 Институциональная логика управления использованием при координации «воздух - земля»

Интегрированное управление использованием является ключевым средством эффективного использования низковысотных ресурсов и обеспечения территориально-пространственной безопасности. Опираясь на институциональные нормы и замкнутый регуляторный контур, оно должно глубоко соединяться с существующей системой территориально-пространственного планирования и реализовываться практически. Это отвечает на текущие слабости Китая, включая недостаточную связь между институтами управления использованием и планировочной системой, а также трудности внедрения управленческих требований в процессы реализации планов. Оно также поддерживает интеграцию авиации общего назначения и низковысотной экономики, предусмотренную национальным планом современной комплексной транспортной системы.

Рамка проводит управление низковысотным использованием через весь процесс планирования, реализации и оценки воздушного пространства. В классификации использования она различает аварийно-спасательные, коммерческие, общественно-сервисные и индустриально-операционные виды, а также формирует дифференцированные стандарты. Она устанавливает многомерное соответствие между типом территориального землепользования, типом низковысотной деятельности и уровнем интенсивности контроля. В реализации усиливается сочетание планировочной увязки, технологического усиления и межведомственной координации,

поддерживается нижний предел безопасности и обеспечивается эффективное использование ресурсов.

3.4.2 Зонирование использования, ориентированное на территориально-пространственное планирование

На уровне оптимизации планирования содержание низковысотного управления должно быть прямо включено в территориально-пространственное генеральное планирование, детальное планирование, комплексное транспортное планирование и соответствующие специальные планы. Генеральное планирование должно уточнять низковысотные функциональные зоны и стратегические требования. Детальное планирование должно конкретизировать пространственные единицы и требования контроля. Специальное планирование должно соединять низковысотную инфраструктуру, маршруты, коридоры и операционные сценарии. В реализации требования низковысотного управления следует связывать с планировочными разрешениями, а межведомственные механизмы должны объединять низковысотное управление, размещение инфраструктуры и одобрение проектов.

Динамическое обновление должно опираться на национальный плановый контур 2021-2035 годов и учитывать изменение низковысотных бизнес-форм и операционного спроса. Правила управления и границы зон следует регулярно оптимизировать. Эффекты реализации должны возвращаться в пересмотр планов через замкнутый цикл подготовки, реализации, оценки и корректировки, обеспечивая координацию низковысотного воздушного пространства с системой территориально-пространственного планирования.

3.4.3 Классификация использования, ориентированная на территориально-пространственное управление

Интегрированное управление использованием также требует уточнения классификации. Разные типы территориального пространства соответствуют разным низковысотным активностям и интенсивности контроля. Городские земли застройки поддерживают высокоинтенсивные пассажирские перевозки UAM и дроновую логистику, а также менее интенсивные городские инспекции и аварийное реагирование. Сельские земли застройки поддерживают сельскую логистику и сельский коммерческий туризм. Сельскохозяйственные земли поддерживают аграрные инспекции, защиту растений и мониторинг посевов. Экологические пространства поддерживают экологические патрули, мониторинг растительности, защиту биоразнообразия и мониторинг бедствий или водной среды. Система классификации должна сочетать административное регулирование, рыночное направление и технологическое усиление, связывая интенсивность управления со свойствами деятельности и чувствительностью подстилающего землепользования.

Таблица 3. Пример многомерного соответствия между территориальным землепользованием, низковысотной деятельностью и интенсивностью контроля

Тип территориально-го пространства	Тип землепользования	Типичная низковысотная деятельность	Интенсивность контроля
Городское	Городские земли	Пассажирские	Высокая

пространство	застройки	перевозки UAM	
Городское пространство	Городские земли застройки	Дроновая логистика	Высокая
Городское пространство	Городские земли застройки	Городские инспекции и аварийно-спасательные операции	Низкая
Городское пространство	Городские земли застройки	Низковисотный туризм и коммерческая аэросъемка	Средняя
Сельское пространство	Сельские земли застройки	Сельская логистика	Средняя
Сельское пространство	Сельские земли застройки	Сельский коммерческий туризм	Средняя
Аграрное пространство	Пахотные земли	Аграрная инспекция	Низкая
Аграрное пространство	Пахотные земли	Защита растений на полях	Низкая
Аграрное пространство	Пахотные земли	Динамический мониторинг посевов	Низкая
Аграрное пространство	Сады, лесные земли, луга и другие земли сельскохозяйственного производства	Инспекция лесных ресурсов	Высокая
Аграрное пространство	Сады, лесные земли, луга и другие земли сельскохозяйственного производства	Пожарное патрулирование	Средняя
Аграрное пространство	Сады, лесные земли, луга и другие земли сельскохозяйственного производства	Экологическое патрулирование	Средняя
Экологическое пространство	Земли экологической охраны, включая водно-	Регулярный мониторинг	Средняя

	болотные угодья, охраняемые территории, неиспользуемые земли и иные земли экологических функций	растительности	
Экологическое пространство	Земли экологической охраны	Патрулирование защиты биоразнообразия	Средняя
Экологическое пространство	Земли экологической охраны	Динамический мониторинг геологических бедствий и водной среды	Средняя

3.5 Анализ кейса: интегрированное зонирование низковысотного воздушного пространства в Цзинане

3.5.1 Территория кейса и процесс оценки

Кейс Цзинаня применяет предложенную рамку. Он формирует систему оценки низковысотных ресурсов с использованием многоисточниковых данных, включая распределение препятствий, военное воздушное пространство, аэропортовое воздушное пространство, наземные функции, промышленное размещение, чувствительные элементы и операционный спрос. Оценка организована вокруг трех критериев: емкость, риск и спрос. Оценка емкости учитывает распределение препятствий, обход конфликтов и анализ высоты полета. Оценка риска учитывает военное и аэропортовое пространство, чувствительные элементы и ограничения безопасности. Оценка спроса рассматривает наземные функции, промышленное размещение и потребности использования (рисунок 3).

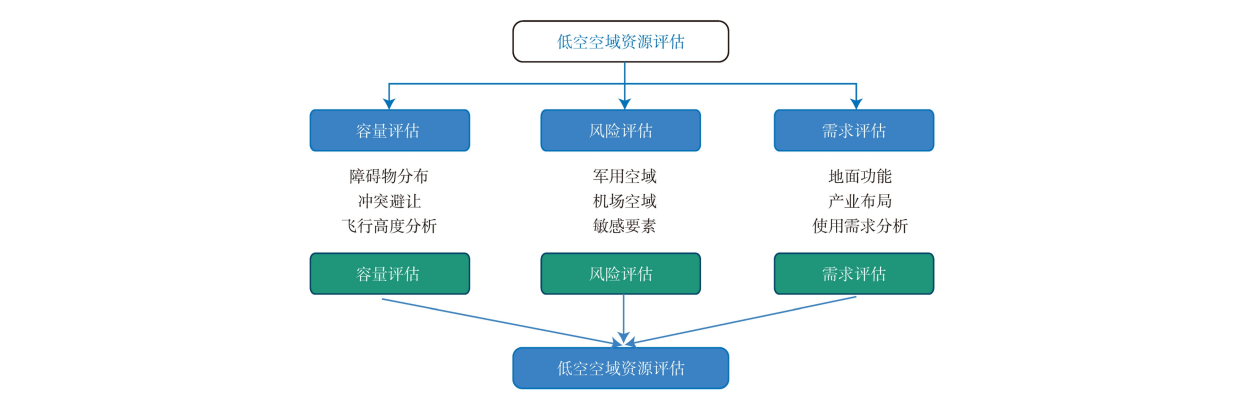


Рисунок 3. Иллюстративная рамка оценки ресурсов низковысотного воздушного пространства

3.5.2 Послойное, зональное и временное управление использованием

На стадии реализации кейс сочетает воздушное слоение с наземным зонированием. По вертикали воздушное пространство делится по истинной высоте на слои 0-300 м, 300-600 м и 600-1000 м, соответствующие низкоскоростным полетам, среднескоростным полетам и более высоким

аварийным или дальним операциям. На земле политически и военно чувствительные зоны, высотные здания, территории риска геологических бедствий, общественная инфраструктура и другие контролируемые пространства используются как ключевые ограничения. Затем результаты оценки пригодности переводятся в пригодные, условно пригодные и ограниченные зоны, что обеспечивает согласованное воздушное зонирование и наземный контроль.

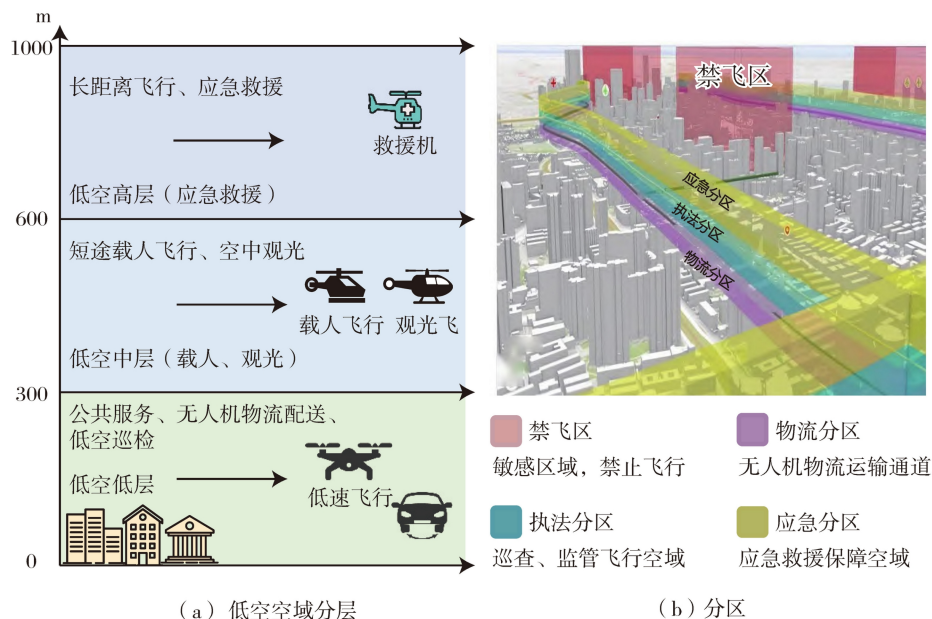


Рисунок 4. Схематическое изображение управления использованием

Кейс также вводит временное управление. В пиковые периоды полетные ограничения ужесточаются, а аварийные полеты получают приоритет. В обычные периоды ограничения умеренно ослабляются, чтобы обеспечить бесперебойность грузовых и общественно-сервисных коридоров. В периоды низкого спроса допускаются специальные полеты, такие как ночная логистика и инспекции безопасности, при строгом контроле шума и светового загрязнения. Такое сочетание слоев, зон и временных режимов позволяет точнее реагировать на сложные потребности низковысотной деятельности.

3.5.3 Практическая адаптивность и опыт

Главный опыт кейса состоит в предварительном внедрении предложенного процесса интегрированного зонирования «воздух - земля» и системы зонально-классифицированного управления, что частично преодолело ограничения традиционного управления низковысотным воздушным пространством. Кейс выстраивает полную технологическую цепочку от интеграции данных к комплексной оценке и реализации зонирования. На основе «единой карты» территориально-пространственного планирования он объединяет многоисточниковые данные воздуха и земли и устраняет разрыв между неоднородными данными. Количественная модель соответствия землепользования и активности классифицирует пригодность воздушного пространства по всей территории, а результаты оценки переводятся в набор ограничений для зонирования, обеспечивая переход от данных к применимым правилам.

Со стороны управления пилотная трехмерная система слоев, зон и временных режимов также преодолевает ограниченность традиционного одномерного контроля. По сравнению с правилами,

которые сосредоточены только на высотном слое или региональных запретах и ограничениях, управленческая матрица, сформированная связкой трех типов правил, лучше адаптируется к сложным потребностям низковисотной деятельности. Однако с точки зрения полного охвата и полного набора элементов система все еще имеет недостатки в межтерриториальной координации правил и поддержке сельских территорий, охраняемых природных территорий и других негородских пространств. В дальнейшем необходимо улучшить межрегиональную увязку правил и построить динамический, постепенный механизм корректировки планов, поддерживающий более широкий масштаб координации низковисотных ресурсов.

4 Обсуждение и выводы

4.1 Основные выводы

Исследование сосредоточено на зонировании низковисотного воздушного пространства и управлении его использованием с позиции территориально-пространственного управления полного охвата и полного набора элементов. Оно формирует системную рамку технологий интегрированного зонирования и управления использованием. Исследование подтверждает, что низковисотное воздушное пространство уже эволюционировало от простого «средства полета» к трехмерному территориальному ресурсу, требующему трехмерного подтверждения прав и тонкого распределения. Сущность координации «воздух - земля» состоит в двусторонней игре и динамическом балансе между наземными интересами развития и воздушными интересами доступа.

Предложенная технология зонирования на основе картирования наземных рисков и система управления использованием по принципу «зона - классификация - уровень» преодолевают ограничение традиционного воздушного управления, которое делает акцент на небе и недооценивает землю. Они дают операционный технический интерфейс для включения низковисотного воздушного пространства в «единую карту» территориально-пространственного планирования. Кейс показывает, что рамка способна соединять данные, оценку, зонирование и правила и имеет практическую реализуемость для распределения и управления низковисотными ресурсами.

4.2 Рекомендации по политике

Зонирование низковисотного воздушного пространства и управление использованием должны быть встроены в систему территориально-пространственного планирования, с усилением планировочной увязки и реализации. Во-первых, необходимо ускорить разработку специальных планировочных стандартов для городской низковисотной и интегрированной воздушно-наземной инфраструктуры. Они должны уточнять ключевые показатели, включая низковисотное зонирование и размещение объектов, включать эти требования в единицы детального территориально-пространственного планирования и переводить их в конкретные планировочно-управленческие единицы с правовой основой реализации.

Во-вторых, следует усилить управленческую увязку. Ведомства природных ресурсов, гражданской авиации и другие органы должны создать механизмы сотрудничества и единую платформу обмена данными о низковисотных ресурсах, интегрировать многоисточниковые данные и открыть межведомственные цепочки согласования и надзора. В-третьих, в городских ядрах следует вводить гибкое резервирование с учетом итеративных характеристик низковисотных отраслей. Коридоры общественных услуг, транспортные узлы и сервисные коридоры

вертикального взлета и посадки должны планироваться заранее, с ясной связью между управлением воздушным пространством и наземными строительными ограничениями, чтобы низковысотные ресурсы не утрачивались безвозвратно. Наконец, цифровые двойники, интеллектуальные GIS полного пространства и смежные технологии должны использоваться для построения динамического контура обратной связи «планирование - мониторинг - оценка - предупреждение». Это позволит в реальном времени отслеживать реализацию планов и динамику полетов, поддерживать регулярную оценку, соединяться с динамической корректировкой территориально-пространственного планирования и переводить низковысотное управление от статичного чертежа к динамическому управлению.

4.3 Ограничения и перспективы

Данное исследование является начальным исследованием зонирования низковысотного воздушного пространства, управления использованием и планировочной увязки. Оно предлагает интегрированную рамку «воздух - земля», которая дает идеи для планирования и управления в низковысотной сфере, но остается ограниченной в двух отношениях. С точки зрения данных доступ к детализированным городским 3D-моделям выше уровня LOD3 затруднен, поэтому микровалидация предложенной технологии в сложной застроенной среде пока недостаточна. Технически рамка основана главным образом на статической физической пространственной форме и не полностью учитывает реальное воздействие динамических метеорологических и физических полей, включая ветровое поле и электромагнитную среду, на зонирование воздушного пространства. Следовательно, ей пока недостает динамического анализа пространственного сопряжения «воздух - земля».

Будущие исследования будут сосредоточены на динамическом сеточном зонировании воздушного пространства на основе данных реального времени, а также на количественных моделях оценки емкости низковысотного воздушного пространства. Это позволит дать более точную научную поддержку эффективной работе низковысотной экономики.

Список литературы

- [1] Ли Сяохуа. Государственное руководство, построение промышленной экосистемы и развитие низковысотной экономики. *Reform*, 2025(2): 21-35.
- [2] Дан Аньжун, Чжан Чаоян, Ван Фэйфэй и др. Прогресс и перспективы исследований планирования низковысотной инфраструктуры. *Journal of Human Settlements in West China*, 2025, 40: 25-33.
- [3] Чжан Хунхай, Ли Шань, И Цзя и др. Обзор планирования городских низковысотных маршрутов. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 53(6): 827-838.
- [4] Ляо Сяохань, Хуан Яохуань, Сюй Чэньчэнь. Исследование низковысотных воздушных ресурсов для приложений БПЛА. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76: 2607-2620.
- [5] Ван Цзиву, Ван Инин, Чжан Цзюньшэнь. Планировочные стратегии использования низковысотного воздушного пространства в условиях низковысотной экономики. *Planners*, 2025, 41: 31-38.
- [6] Фэй Юйхань, Чжан Хунхай, Чжан Ляньдун и др. Планирование маршрутов городских логистических перевозок дронами. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2023, 47: 79-84.

- [7] Uber. Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation. 2016-10-27. https://evtol.news/___media/UE_WhitePaper_2016.pdf.
- [8] Лю Цзявэнь, Ван Люйин, Шэнь Тун и др. Развитие низковысотной экономики в Китае и за рубежом и сценарии ее применения в железнодорожной сфере. *Railway Transport and Economy*, 2025, 47: 30-43.
- [9] Цзинь Лися, Ли Шань, Цзэн Цзяжун и др. Vertical-oriented development (VOD): международное сравнение и путь Китая. *Urban Planning Forum*, 2026(1): 73-80.
- [10] Ван Цзюньтун, Бао Даньвэнь, Чжоу Цзяи и др. Состояние и перспективы исследований планирования низковысотного воздушного пространства. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46: 82-107.
- [11] Гао Чжихун. Правовое строительство управления воздушным пространством для низковысотной экономики. *China Law Review*, 2025: 184-195.
- [12] Кун Дэцзянь, Юань Цзэ. Состояние, опыт и перспективы политико-правовой системы низковысотной экономики. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition)*, 2024, 37: 85-95.
- [13] Центральный комитет КПК и Государственный совет. Мнения о создании системы территориально-пространственного планирования и надзоре за ее реализацией. 2019-05-23. http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm.
- [14] Юй Хайтао, Линь Цзянь, Пэн Чжэньвэй и др. Академический диалог о совершенствовании системы контроля использования территориального пространства. *Urban Planning Forum*, 2023(5): 1-11.
- [15] Federal Aviation Administration. Small unmanned aircraft systems (UAS) regulations (Part 107). 2020-10-06. <https://www.faa.gov/newsroom/small-unmanned-aircraft-systems-uas-regulations-part-107>.
- [16] European Commission. Commission Implementing Regulation (EU) 2021/664 of 22 April 2021 on a regulatory framework for the U-space. 2021-04-23. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021R0664>.
- [17] Finn R. L., Wright D. Unmanned aircraft systems: surveillance, ethics and privacy in civil applications. *Computer Law & Security Review*, 2012, 28(2): 184-194.
- [18] Хуан Цзяньчжун, Хэ Цзявэнь, Чжан Вэйцун и др. Городское низковысотное планирование: элементы, пути реализации и планировочные ответы координации земли и воздуха. *Urban Planning Forum*, 2025(5): 14-22.
- [19] International Civil Aviation Organization. Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management (PANS-ATM, Doc 4444). 16th ed. Montreal: ICAO, 2016.
- [20] Цюань Цюань, Ли Ган, Бай Ицин и др. Обзор и предложения по управлению низковысотным движением БПЛА. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(1): 6-34.
- [21] Чэнь Чжицзе. Технические вызовы будущего развития систем управления воздушным движением. *Command Information System and Technology*, 2016, 7(6): 1-5.
- [22] Би Юньлун, Тан Липин, Ту Мэнчжао и др. Историческая эволюция, местная практика и системное построение контроля использования территориального пространства. *Planners*, 2025, 41: 78-85.

- [23] Ван Чжоулинь, Чэнь Вэйчжэнь. Механизм и модель управления территориально-пространственным планированием с позиции теории «права контроля». *Urban Development Studies*, 2021, 28(6): 50-57.
- [24] Генеральная канцелярия Государственного совета. Руководящие мнения о содействии развитию авиации общего назначения. 2016-05-13. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/17/content_5074120.htm.
- [25] Линь Цзянь, У Юйсян, У Цзяюй и др. О построении системы пространственного планирования: пространственное планирование, контроль использования территориального пространства и надзор за природными ресурсами. *City Planning Review*, 2018, 42(5): 9-17.
- [26] Тан Синьминь, Гу Цзюньвэй, Лю Бин и др. Обзор низковысотных технологий наблюдения и тенденций их развития. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 56: 973-993.
- [27] Фань Чжэ, Юй Фэнъюань, Чжао Цзяньбо. Состояние и тенденции технологий испытания навигационных систем низковысотных летательных аппаратов. *Metrology & Measurement Technology*, 2025, 45: 100-110.
- [28] Цюань Цзайсинь, У Динцзе, Гао Цзяцзин и др. Обзор городского низковысотного воздушного движения и планирования маршрутов БПЛА. *Aeronautical Computing Technique*, 2024, 54(4): 121-126.
- [29] Kopardekar P., Rios J., Prevot T., et al. Unmanned aircraft system traffic management (UTM) concept of operations. 2016-06-13. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160003003>.
- [30] SESAR Joint Undertaking. U-space concept of operations (CONOPS). 2019-09-30. <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS%20ConOps%20vol2.pdf>.
- [31] Чжу Юнвэнь, Чэнь Чжицзе, Пу Фань и др. Научные и технические вопросы интеллектуального управления воздушным движением. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25: 174-184.
- [32] Цзя Юннань. Предварительное исследование схем управления движением беспилотных систем в низковысотном воздушном пространстве. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46: 121-147.
- [33] Dorling K., Heinrichs J., Messier G. G., et al. Vehicle routing problems for drone delivery. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(1): 70-85.
- [34] Чэнь Сяо, Мао Ебин. Состояние и перспективы применения технологии ADS-B в безопасности низковысотного воздушного пространства. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(20): 61-67.
- [35] Цай Мин, Ма Чуаньци, Чжу Хуаса и др. Обзор технологий обеспечения безопасности низковысотных операций. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2025, 23: 1-26.
- [36] Ши Чуньхуэй, Лю Цзэ, Ю Сяо и др. Контроль использования низковысотного воздушного пространства на основе прав низковысотного развития: состояние, теория и институциональная система. *Urban Planning Forum*, 2026(1): 65-72.
- [37] Лю Цюань, Чэнь Яояо, Хун Сяовэй и др. Международный опыт городского низковысотного воздушного планирования для БПЛА. *Urban Planning Forum*, 2024(5): 64-70.
- [38] Ни Хунфу, Ван Сяосин. Экономическая логика управления низковысотным воздушным пространством. *Southeast Academic Research*, 2025(4): 175-187.

- [39] Ван Цзяоэ, Ду Дэлинь. Географическая интерпретация низковысотной экономики и теоретический анализ низковысотной системы «человек - земля». *Resources Science*, 2025, 47: 1628-1639.
- [40] Public-Private Committee for Advanced Air Mobility. Concept of operations for advanced air mobility. 2023-12-06. <https://www.aero.jaxa.jp/eng/research/star/concerto/>.
- [41] European Union Aviation Safety Agency. Study on the societal acceptance of urban air mobility in Europe. 2021-05-19. <https://trid.trb.org/View/1869021>.
- [42] Transport Canada. Aeronautical Information Manual (TC AIM). 2025-10-02. <https://tc.canada.ca/en/aviation/publications/aeronautical-information-manual-aim>.
- [43] Civil Aviation Safety Authority. Civil Aviation Safety Regulations 1998. 2024-11-29. <https://www.legislation.gov.au/F2024L01553/asmade/2024-11-29>.
- [44] United Kingdom Civil Aviation Authority. The Air Navigation Order 2016. 2016-07-13. <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2016/765/contents>.
- [45] Фэн Минсян, Ли Хайцзюнь, Янь Фэй и др. Метод идентификации и расчета городских зон ограничения низковысотных полетов на основе интеграции многоисточниковых данных. *Urban Planning Forum*, 2025(Suppl. 2): 146-153.
- [46] Ся Хао, Линь Юэвэй, Янь Цзюнь и др. Обзор ключевых технологий интегрированной связи и сенсорики для низковысотных БПЛА. *Telecommunication Engineering*, 2025, 65(6): 838-847.
- Перевод при содействии ИИ