УДК 004.9:528.9

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА КАК ОСНОВА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ЦИФРОВОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ОИЯИ

Трофимов Юрий Владиславович[1], Семашко Сергей Владимирович[2], Белов Сергей Дмитриевич[3], Лебедев Александр Дмитриевич[4], Кузнецов Егор Михайлович[5], Летов Александр Владимирович[6]

[1]*Младший научный сотрудник,*
Объединённый институт ядерных исследований,
141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6,
e-mail: ytrofimov@jinr.ru.

[2]*Ведущий программист,*
Объединённый институт ядерных исследований,
141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6,
e-mail: semashko@jinr.ru.

[3]*Кандидат технических наук, начальник сектора,*
Объединённый институт ядерных исследований,
141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6,
e-mail: belov@jinr.ru.

[4]*Студент,*
Государственный университет «Дубна»,
141980, Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, 19,
e-mail: lad.24@uni-dubna.ru.

[5]*Старший лаборант,*
Объединённый институт ядерных исследований,
141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6,
e-mail: kuznecovem@jinr.ru.

[6]*Студент,*
Государственный университет «Дубна»,
141980, Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, 19,
e-mail: lav.26@uni-dubna.ru.

Работа посвящена методологии организации пространственной инфраструктуры Цифровой экосистемы ОИЯИ. На основе анализа GIScience, GeoAI, опыта научных кампусов и существующих ГИС предложена объектно-центрическая федерация пространственных данных. Её основу составляют устойчивые институциональные идентификаторы физических объектов, сохранение ответственности профильных источников, единые правила связи пространственных представлений и независимое развитие прикладных компонентов. Подход реализован в ГИС ОИЯИ, объединяющей каталог, карту, наружную и внутреннюю маршрутизацию, мобильный интерфейс, редактор, 3D/BIM-представления и резервирование помещений. Общая система идентификаторов и пространственных связей формирует контекст для дальнейшего развития базы знаний, аналитических модулей и интеллектуальных сервисов.

Ключевые слова: геоинформационная система ОИЯИ, цифровая экосистема, пространственный интеллект, объектно-центрическая интеграция, федеративная интеграция данных, корпоративная ГИС, кампусная ГИС, пространственная инфраструктура, навигация внутри зданий, 3D/BIM, база знаний.

Для цитирования:

Геоинформационная система как основа пространственного интеллекта Цифровой экосистемы ОИЯИ / Ю. В. Трофимов, С. В.Семашко, С. Д. Белов [и др.] // Системный анализ в науке и образовании. 2026. № 3. С. 58–78. EDN: FXCKDN. URL: https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/736.

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru

THE GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM AS A FOUNDATION FOR SPATIAL INTELLIGENCE IN THE JINR DIGITAL ECOSYSTEM

Trofimov Yuri V.[1], Semashko Sergey V.[2], Belov Sergey D.[3], Lebedev Alexander D.[4], Kuznetsov Egor M.[5], Letov Alexander V.[6]

[1]*Junior Researcher,*
Joint Institute for Nuclear Research,
6 Joliot-Curie St., Dubna, Moscow Region, 141980, Russia,
e-mail: ytrofimov@jinr.ru.

[2]*Lead Programmer,*
Joint Institute for Nuclear Research,
6 Joliot-Curie St., Dubna, Moscow Region, 141980, Russia,
e-mail: semashko@jinr.ru.

[3]*Candidate of Technical Sciences, Head of Sector,*
Joint Institute for Nuclear Research,
6 Joliot-Curie St., Dubna, Moscow Region, 141980, Russia,
e-mail: belov@jinr.ru.

[4]*Student,*
Dubna State University,
19 Universitetskaya St., Dubna, Moscow Region, 141980, Russia,
e-mail: lad.24@uni-dubna.ru.

[5]*Senior Laboratory Assistant,*
Joint Institute for Nuclear Research,
6 Joliot-Curie St., Dubna, Moscow Region, 141980, Russia,
e-mail: kuznecovem@jinr.ru.

[6]*Student,*
Dubna State University,
19 Universitetskaya St., Dubna, Moscow Region, 141980, Russia,
e-mail: lav.26@uni-dubna.ru.

This paper presents a methodology for organising the spatial infrastructure of the JINR Digital Ecosystem. Based on GIScience, GeoAI, scientific-campus experience, and existing GIS platforms, an object-centred federation model for spatial data is proposed. It combines stable institutional identifiers, responsibility of domain data sources, common rules for linking spatial representations, and independent evolution of application components. The approach is implemented in the JINR GIS, integrating catalogue and search, mapping, outdoor and indoor routing, a mobile interface, an editor, 3D/BIM representations, and room reservation. Shared identifiers and spatial relationships provide context for future knowledge-base, analytical, and intelligent services.

Keywords: JINR geographic information system, digital ecosystem, spatial intelligence, object-centred integration, federated data integration, enterprise GIS, campus GIS, spatial infrastructure, indoor navigation, 3D/BIM, knowledge base.

For citation:

Trofimov Yu. V., et al. The Geographic Information System as a Foundation for Spatial Intelligence in the JINR Digital Ecosystem. *System analysis in science and education*, 2026;(3):58–78 (in Russ). EDN: FXCKDN. Available from: https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/736.

Введение

Цифровая инфраструктура крупного научного центра должна учитывать административные и информационные процессы наряду со спецификой исследовательской инфраструктуры. Эксплуатация крупных установок, лабораторий и инженерных объектов связана с работой подразделений, научных

коллабораций и участников пользовательских программ, поэтому сведения о физической инфраструктуре оказываются востребованы одновременно в организационных, инженерных и исследовательских сценариях. Для Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) такая постановка особенно характерна, поскольку его научная программа опирается на крупные установки и пользовательскую инфраструктуру, с которыми связаны международные и межлабораторные коллаборации [1]. Сходная потребность существует в Европейской организации по ядерным исследованиям (*CERN*), где геоинформационная система (ГИС) используется для пользовательской навигации и профессиональной работы с инфраструктурой и инженерными данными [2].

В ОИЯИ ГИС развивается как часть Цифровой экосистемы (ЦЭС) [3]. Первой версией ГИС была интерактивная карта территории, предназначенная для поиска зданий и сотрудников [4]. По мере развития ЦЭС ГИС вышла за рамки первоначального поискового сценария. В системе появились маршрутизация и механизм резервирования помещений. Пространственные сведения о размещении сотрудников стали использоваться также в системе *PIN* («Персональная информация»). Пространственные данные при этом оказались задействованы в нескольких прикладных процессах ЦЭС, связанных с одними и теми же физическими объектами.

Расширение числа связанных сервисов приводит к тому, что один физический объект получает несколько цифровых представлений. Например, здание одновременно представлено геометрией на карте, справочными сведениями, связанными помещениями и маршрутами, а в отдельных случаях – инженерной 3*D*-моделью. В теории геоинформационных систем эта задача связана с интеграцией пространственных и атрибутивных данных [5]. При независимом обновлении источников связанные записи могут иметь разные идентификаторы, версии и жизненные циклы [6], поэтому требуется определить, какие записи относятся к одному физическому объекту и какие связи между ними должны сохраняться [7].

В рамках рассматриваемой архитектуры под пространственным интеллектом понимается способность цифровых сервисов учитывать согласованный пространственный контекст при выполнении прикладных задач. Такой контекст включает идентификатор объекта, его положение и принадлежность зданию или помещению, пространственные связи, доступные маршруты и ограничения, а также связанные справочные и инженерные сведения. ГИС формирует и поддерживает этот контекст на основе интеграции корпоративных и геопространственных данных, поэтому предметом исследования является архитектура такой интеграции в цифровой инфраструктуре научного центра.

Цель работы состоит в разработке и обосновании методологии организации пространственной инфраструктуры на примере ГИС ОИЯИ, а ключевая задача – в обеспечении устойчивой связи цифровых представлений физических объектов при независимом развитии профильных информационных систем. Для обоснования предлагаемого подхода рассматриваются развитие методов работы с пространственными данными, опыт институциональных систем и архитектурные свойства существующих ГИС-платформ.

Научно-методическим результатом работы является объектно-центрическая модель федерации пространственных данных применительно к цифровой инфраструктуре научного центра. В этой модели физический объект рассматривается как устойчивая единица интеграции, а его цифровые представления связываются через институциональные идентификаторы и пространственные отношения. Предложенные положения используются далее как основа сравнительного анализа существующих решений и рассматриваются на примере реализации ГИС ОИЯИ.

1. О задачах пространственного интеллекта в цифровой экосистеме института

Принятое определение пространственного интеллекта задаёт требования к организации пространственной инфраструктуры ЦЭС. Прикладные сервисы должны обращаться к физическому объекту независимо от того, в каком цифровом представлении он используется. Для здания такими представлениями могут быть геометрия на карте, модель внутренних пространств, маршрутный граф и инженерная 3*D*-модель. Маршрутный граф описывает связи между помещениями, входами и переходами. С объектами этой модели могут быть связаны прикладные сервисы, например сервис резервирования помещений. Поэтому пространственная модель должна сохранять соответствие между

физическим объектом и его представлениями, а также явно задавать отношения, необходимые для пространственных операций. Эта модель не должна зависеть от конкретного пользовательского приложения. На рис. 1 показан принятый в Цифровой экосистеме ОИЯИ принцип разделения общей модели физических объектов и сервисного уровня. Через сервисный уровень прикладные системы получают доступ к идентификаторам объектов, функциям поиска и пространственным операциям. Благодаря такому разделению поиск, навигация, работа с планами, 3*D*-представлениями и резервированием помещений могут использовать одну пространственную основу без создания собственных моделей тех же физических объектов.



Рис. 1. ГИС как основа пространственного интеллекта Цифровой экосистемы ОИЯИ

Выполнение этих требований предполагает явное представление объектов и отношений между ними, поддержку пространственных операций, описание семантики и контроль согласованности данных. Такие возможности формировались постепенно по мере развития методов работы с пространственными данными.

2. От пространственного анализа к интеллектуальным геоинформационным системам

Современная ГИС работает с пространством как с формализованной моделью, над которой могут выполняться вычисления. Такое понимание сформировалось постепенно по мере того, как карта переставала быть только способом отображения данных и становилась интерфейсом к пространственным объектам и отношениям между ними. Дальнейшее развитие геоинформационной науки расширило требования к представлению пространственных данных, их качеству и неопределённости, а современные методы искусственного интеллекта добавили новые способы их обработки. Для предлагаемой архитектуры существенен именно этот переход от картографического представления к модели пространства, в которой объекты и связи между ними заданы явно.

Пространственный анализ сформировался раньше массового распространения компьютерных ГИС. В количественной географии 1950-х и 1960-х годов положение объектов стали описывать через формализованные пространственные отношения и статистические зависимости. П. Хаггетт систематизировал методы анализа размещения [8], а Б. Берри и Д. Марбл представили пространственный анализ как самостоятельный набор количественных методов [9]. В. Тоблер сформулировал один из базовых принципов пространственного анализа, согласно которому близкие объекты обычно связаны сильнее, чем удалённые [10]. Этот принцип подчёркивает, что для пространственной задачи существенны свойства объектов и отношения между ними. Компьютерная ГИС сделала такие отношения вычисляемыми, объединив геометрию и атрибуты объектов со средствами пространственного и сетевого анализа. В начале 1990-х годов связь ГИС с методами анализа пространственных данных уже рассматривалась как отдельная исследовательская проблема [11]. Л. Анселин и А. Гетис показали, как пространственная статистика может быть встроена в

аналитический аппарат ГИС [12]. Карта перестала быть только конечным изображением и стала интерфейсом к модели пространства, над которой выполняются вычисления.

На рис. 2 показана последовательность накопления возможностей. Пространственный анализ добавил к координатам отношения и операции. Геоинформационная наука (*Geographic Information Science, GIScience*) поставила вопросы о том, как представлять эти отношения, учитывать масштаб, точность, неопределённость и происхождение данных. Геоинформационная система выступает технической средой для работы с пространственными объектами, а геоинформационная наука описывает принципы их представления и исследования. Выделение *Geographic Information Science* в самостоятельное научное направление связано, в частности, с работой М. Гудчайлда [13]. Явная модель пространственных объектов и отношений особенно важна для институциональной ГИС, поскольку позволяет согласованно работать с представлениями одного физического объекта в разных информационных системах.



Рис. 2. Развитие подходов к представлению и обработке пространственных данных: от пространственного анализа к ГИС-агентам

Интеллектуальная обработка пространственных отношений имеет длительную историю. В отечественной традиции исследований в области ИИ значительное место занимают работы Д. А. Поспелова [14]. В разработанной Д. А. Поспеловым пространственной псевдофизической логике отношения между объектами рассматривались как предмет формального представления и вывода. Это направление получило систематическое изложение в монографии Е. Ю. Кандрашиной, Л. В. Литвинцевой и Д. А. Поспелова о представлении знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах [15]. В зарубежных исследованиях Т. Смит рассматривал применение методов ИИ к географическим задачам и интеллектуальным ГИС [16], Х. Куклелис связывала это направление с моделированием географических знаний [17], а С. Опеншоу – с пространственным моделированием и автоматизацией аналитических процедур [18]. Работы по пространственно-временному рассуждению развивали формальные способы вывода над пространственными отношениями [19]. Для предлагаемой архитектуры эта линия важна, поскольку интеллектуальная обработка пространства предполагает явное представление объектов и отношений между ними, а не только их картографическое отображение.

Современный геопространственный искусственный интеллект (*Geospatial Artificial Intelligence, GeoAI*) расширяет эту линию методами машинного обучения. В работе К. Яновича и соавторов *GeoAI* рассматривается как ИИ с явным учётом пространственной структуры географических данных [20]. Современные исследования относят к этому направлению дистанционное зондирование, городскую аналитику, геопространственную семантику, картографию и методы, использующие географические знания [21]. Для пространственной задачи местоположение меняет смысл данных, а соседство, направление, иерархия территорий и связи в сети входят в саму постановку задачи. Для применения *GeoAI* существенны качество пространственной модели и явное представление пространственных отношений, используемых при анализе.

Современное развитие этого направления связано с геоинформационными агентами. В *GIS Copilot* и автономных ГИС-агентах языковая модель формирует последовательность пространственных операций и выбирает необходимые данные [22, 23]. Для этого используются инструменты ГИС и структурированные сведения об их функциях, параметрах и источниках. В *GeoAnalystBench* оцениваются валидность и структурная согласованность формируемых языковыми моделями последовательностей пространственного анализа, а также качество генерируемого кода. Наиболее сложными остаются задачи, требующие более глубокого пространственного рассуждения [24].

Переход от картографического приложения к институциональной пространственной платформе прослеживается и в *CERN*, где пространственные данные используются несколькими пользовательскими и профессиональными сервисами. Для пользовательских задач используется *Map CERN*, предназначенный для поиска зданий, помещений, сервисов и маршрутов. Профессиональная работа с инфраструктурными данными сосредоточена в *GIS Portal*. Для поэтажных планов и подземных объектов используется *Planotheque*, тогда как *CERN in* 3*D* объединяет трёхмерные сцены, данные систем автоматизированного проектирования (*CAD*) и облака точек [2]. В материалах 2026 года *GIS Portal* характеризуется как центральная платформа просмотра и визуализации географических данных *CERN* [25]. Такой подход показывает, что общая пространственная инфраструктура может обслуживать приложения с различными функциями и группами пользователей.

Сходный принцип используется в проектах цифровых кампусов. В *Texas A&M University* пространственные данные о зданиях, включая идентификаторы, координаты, высоты и геометрию, используются как основа пространственно-временной модели кампуса. К ней подключаются сведения о расписании и загрузке помещений, после чего система поддерживает визуальную аналитику, оценку использования ресурсов и пользовательские маршруты [26]. В этом случае ГИС связывает физическую структуру кампуса с данными о его текущей деятельности. Для научной организации близок пример Национальной лаборатории возобновляемой энергии США (*National Renewable Energy Laboratory, NREL*). Платформа *Intelligent Campus* рассматривается как основа цифрового двойника с поэтапным развитием от статических сведений об инфраструктуре и планах зданий к динамическим данным, прогнозной аналитике, моделированию и управлению. В проекте отдельно подчёркивается использование общей схемы данных, обеспечивающей совместимость компонентов и позволяющей подключать новые модели без перестройки всей системы [27].

В *CERN, Texas A&M* и *NREL* реализуются разные архитектурные подходы, однако во всех рассмотренных случаях пространственная платформа выходит за пределы отдельного картографического приложения и связывается с другими данными и процессами организации. Для крупного научного центра такое развитие меняет саму роль ГИС, превращая пространственную модель в общий ресурс для сервисов, которые используют сведения об одной и той же физической инфраструктуре в разных сценариях. В ЦЭС ОИЯИ эта роль реализуется через общую систему идентификаторов и пространственных отношений, которая связывает представления физических объектов на карте, в маршрутной модели, внутренней навигации, 3*D*-представлениях и данных информационного моделирования зданий (*Building Information Modeling, BIM*), а также в сервисе резервирования помещений. База знаний, аналитические и интеллектуальные сервисы могут использовать тот же пространственный контекст при дальнейшем развитии. Эта постановка определяет требования к пространственной основе Цифровой экосистемы научного центра.

3. Методологическая модель пространственной инфраструктуры научного центра

Для организации пространственной инфраструктуры научного центра предлагается объектно-центрическая федерация пространственных данных. Каждому физическому объекту ставится в соответствие устойчивый институциональный идентификатор, с которым связываются его цифровые представления в профильных системах и прикладных сервисах. Федеративный характер модели определяется распределением ответственности за данные и их жизненный цикл между самостоятельными источниками хранения и обновления. Профильные подразделения продолжают вести собственные сведения и отвечать за их актуальность, тогда как пространственная инфраструктура поддерживает связи между представлениями одного физического объекта и сведения об их происхождении и версиях. Каждое представление может обновляться независимо при условии сохранения связи с физическим объектом. Предметная модель, то есть описание физических объектов,

их цифровых представлений и связей между ними, при этом отделяется от прикладных компонентов, которые работают с объектами через программные интерфейсы (*API*) и могут заменяться или развиваться без изменения институциональных идентификаторов и связей между представлениями.

Такая организация позволяет прикладным сервисам ЦЭС обращаться к одной пространственной модели независимо от их назначения. Общие идентификаторы и пространственные связи уже используются в пользовательских и инженерных сценариях и могут в дальнейшем применяться в базе знаний, аналитических модулях и цифровом помощнике. Благодаря этому новые сервисы могут использовать уже сформированный пространственный контекст без создания собственной системы идентификации тех же физических объектов.

Эти положения определяют критерии последующего сравнительного анализа. Сопоставление существующих решений позволяет установить, какие функции могут предоставляться готовыми платформами, какие прикладные компоненты могут оставаться заменяемыми и какие институциональные элементы необходимо сохранять в собственном пространственном ядре ОИЯИ – центральной части архитектуры, поддерживающей общую модель физических объектов, их идентификаторы и пространственные связи.

4. Сравнительный анализ существующих решений

Сравнение существующих решений проводится как качественный архитектурный анализ применительно к задачам цифровой инфраструктуры научного центра. Рассматриваются возможность локальной эксплуатации, контроль корпоративных данных, интеграция со справочниками, работа с территорией и внутренними пространствами, поддержка инженерных представлений, разделение пользовательских и профессиональных приложений, а также зависимость предметной модели от конкретной платформы. Анализ основан на открытой документации и опубликованных материалах, указанных для каждого решения в табл. 1. Если доступные источники не позволяют подтвердить наличие функции или архитектурного свойства, фиксируется отсутствие публичного подтверждения соответствующей возможности. Последняя колонка содержит выводы для архитектуры ГИС ОИЯИ, сформулированные на основе рассмотренных свойств и ограничений решений.

Табл.1. Сравнение существующих ГИС и платформ применительно к задачам ОИЯИ

Решение	**Основное назначение**	**Ограничения для задач ОИЯИ**	**Вывод для архитектуры ГИС ОИЯИ**
IdroGEO [28]	Тематическая веб-ГИС с *API* и отдельными прикладными сервисами.	Ориентирована на природные риски. Помещения, маршруты внутри зданий и связи с корпоративными системами научного центра в предметной модели не предусмотрены.	Интерфейс, прикладные сервисы и картографическая публикация разделены.
Virtual 3*D Campus UTM* [29]	3*D*-модель кампуса на *CityGML/3DCityDB* с веб-визуализацией.	Связи с корпоративными системами и маршрутизация остаются вне 3*D*-модели.	3*D*-модель хранится как отдельное представление объекта и связывается с каталогом и маршрутами.
MazeMap [30], [31]	Навигация по территории и внутри зданий, включая доступные маршруты.	В открытой документации не описаны полностью автономное развёртывание и модель корпоративных данных.	Пользователь получает единый маршрут от территории до помещения.

Решение	**Основное назначение**	**Ограничения для задач ОИЯИ**	**Вывод для архитектуры ГИС ОИЯИ**
CERN GIS [2]	Сервисы научного центра: карта для широкого круга пользователей, профессиональный портал, планы и 3*D*.	Открытые материалы не раскрывают правила идентификации объектов и синхронизации внутренних источников.	Общая пространственная основа обслуживает несколько приложений и групп пользователей.
ArcGIS Enterprise / *Indoors* [32], [33]	Корпоративная платформа с локальным развёртыванием, разграничением прав, публикацией данных, моделью внутренних пространств и навигацией.	Эксплуатация и развитие зависят от лицензируемой платформы и её компонентов.	Идентификаторы объектов и правила их связи сохраняются независимо от прикладных компонентов.
NextGIS Web [34], [35]	Локальная веб-ГИС с *PostGIS*, геосервисами, векторными тайлами и правами доступа.	Связи корпусов, помещений, входов и внутренних справочников нужно задавать отдельно.	Серверный и публикационный слой остаётся заменяемой частью системы.
ГИС «Панорама» [36]	Отечественная настольная и серверная ГИС для локальной эксплуатации.	Модель кампуса, связь со справочниками и маршруты внутри зданий требуют отдельного проектирования.	Платформенные функции можно использовать вместе с собственной моделью объектов.
QGIS Server [37]	Открытый сервер стандартных геосервисов на основе проектов *QGIS*.	Публикация геоданных не задаёт правила корпоративной идентификации и жизненный цикл объектов.	Картографическая публикация отделена от модели объектов и может заменяться.
GeoServer [38]	Открытый картографический сервер с поддержкой стандартов *Open Geospatial Consortium* (*OGC*) и настройкой доступа.	Связи между картой, справочником, помещениями и маршрутами находятся вне геосервера.	Геосервер используется как инфраструктурный слой над собственной моделью объектов.
GeoNode [39]	Портал геоданных с каталогом, метаданными, пользователями и совместной работой.	Каталог наборов данных не решает задачу устойчивой идентификации физических объектов.	Подход полезен для развития каталога пространственных ресурсов.
MapStore [40]	Веб-клиент для тематических карт и объединения разных картографических источников.	Единый интерфейс не устраняет расхождения идентификаторов, версий и владельцев данных.	Клиент остаётся заменяемым и работает с общей моделью объектов.
Bentley iTwin [41]	Инженерный цифровой двойник с версиями моделей, облаками точек и данными эксплуатации.	Инженерная модель не заменяет карту территории, корпоративный каталог и маршрутную сеть.	*3D/BIM* связывается с объектом ГИС как отдельное инженерное представление.

Решение	**Основное назначение**	**Ограничения для задач ОИЯИ**	**Вывод для архитектуры ГИС ОИЯИ**
CARTO Self-hosted [42]	Средства пространственной аналитики, работающие с собственным хранилищем данных.	Аналитический слой не задаёт правила идентификации объектов и согласования источников.	Аналитические модули подключаются к общей модели объектов и связей.
MapInfo Pro / *Spectrum Spatial* [43]	Профессиональная подготовка данных и корпоративная публикация разделены по ролям.	Готовая модель помещений, справочников и маршрутных ограничений ОИЯИ отсутствует.	Профессиональное редактирование отделено от пользовательской публикации. Правила данных остаются общими.
SuperMap iServer / *iPortal* [44]	Корпоративная платформа с серверными и портальными сервисами, 2*D*/3*D*-функциями и управлением пользователями.	Связь с внутренними справочниками и происхождение атрибутов требуют предметной настройки.	Функции платформы можно использовать, не привязывая идентификаторы объектов к одному продукту.
Hexagon M.App Enterprise [45]	Среда специализированных браузерных, настольных и мобильных ГИС-приложений.	Сущности и связи организации всё равно задаются отдельно от прикладной платформы.	Разные приложения могут работать с общей моделью объектов.
Google Maps Platform [46], [47]	Поиск, геокодирование и маршруты с развитым пользовательским интерфейсом.	Внешний сервис зависит от ключей, оплаты и лицензионных условий. Внутренние данные ОИЯИ требуют собственного контура.	Пользовательские сценарии служат ориентиром. Внешний сервис остаётся необязательным компонентом.
Яндекс Карты [48]	Публичные карты, геокодирование и маршрутизация с хорошим покрытием России.	Корпоративная эксплуатация зависит от условий использования и лицензирования.	Внутренние объекты хранятся в собственной системе, внешний сервис подключается отдельно.
2ГИС *On-Premise* [49]	Локальная картография, поиск и маршрутизация в закрытом контуре.	Требует лицензирования и не содержит корпоративные идентификаторы, инженерные связи и предметную модель ОИЯИ.	Картографический или навигационный компонент подключается к собственному ядру ГИС.

Сопоставление выявляет несколько групп архитектурных решений. Корпоративные платформы, включая *ArcGIS Enterprise*, *SuperMap* и решения *Hexagon*, объединяют широкий набор функций в рамках одной технологической среды. Открытые и локально разворачиваемые компоненты, такие как *QGIS Server*, *GeoServer*, *GeoNode*, *MapStore* и *NextGIS Web*, допускают более свободное комбинирование, однако сами по себе не задают предметную модель научного центра и правила интеграции его информационных систем. Навигационные решения ориентированы прежде всего на маршрутные сценарии, тогда как инженерные платформы обеспечивают детальное представление сооружений и работу с 3*D*/*BIM*-данными. Готовые решения могут использоваться как отдельные компоненты пространственной инфраструктуры, тогда как система идентификации физических объектов, связи между их представлениями и правила взаимодействия с системами ЦЭС должны определяться институциональной архитектурой ОИЯИ.

Для научного центра определяющим является не выбор одной универсальной ГИС-платформы, а выделение элементов пространственной модели, которые должны сохраняться независимо от используемой технологии. Опыт *CERN* показывает возможность использования общей пространственной основы несколькими приложениями и группами пользователей, тогда как проекты цифровых кампусов и лабораторных цифровых двойников дополняют её эксплуатационными и аналитическими данными. В ГИС ОИЯИ устойчивую часть архитектуры образует собственная модель физических объектов, их идентификаторов и пространственных связей. Картографический клиент, редактор, маршрутизатор, 3*D*/*BIM*-компоненты и серверные средства могут развиваться или заменяться без изменения этой модели. Такое разделение позволяет использовать готовые технологии, сохраняя за Институтом контроль над идентификаторами объектов, их пространственными связями, происхождением данных и правилами доступа.

5. ГИС ОИЯИ: от картографического сервиса к основе пространственного интеллекта

ГИС ОИЯИ выросла из интерактивной карты для отображения территории и поиска объектов. По мере развития Цифровой экосистемы она стала поддерживать пользовательские, навигационные, редакторские и инженерные сценарии, связанные общей моделью физических объектов. Архивные снимки экрана ранней версии для площадок Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова (ЛЯР) и Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина (ЛФВЭ), приведённые на рис. 3, показывают исходную точку развития системы.



Рис. 3. Предыдущая версия картографического сервиса ОИЯИ: ЛЯР (а) и ЛФВЭ (б)

Развитие ГИС строилось вокруг устойчивой идентификации физических объектов. По мере подключения новых сервисов они использовали уже существующие идентификаторы и пространственные связи. Благодаря этому ГИС постепенно вышла за рамки картографического сервиса и стала выполнять интеграционную функцию в пространственной инфраструктуре Цифровой экосистемы. В используемом для статьи срезе базы ГИС содержатся 7515 записей об объектах и 7594 пространственных представления, включая 130 подготовленных карточек зданий, две геопривязанные 3*D*-модели и 4987 элементов маршрутных данных. Эти показатели характеризуют текущее наполнение системы и разнообразие связанных представлений.

Связь различных представлений обеспечивается единой записью физического объекта с устойчивым идентификатором. С ней соотносятся картографическое, справочное, внутреннее, маршрутное и инженерное представления, а также связи между ними (рис. 4). Соответствующие записи и представления имеют собственные циклы обновления, сохраняя связь с одним физическим объектом через общую систему идентификаторов.

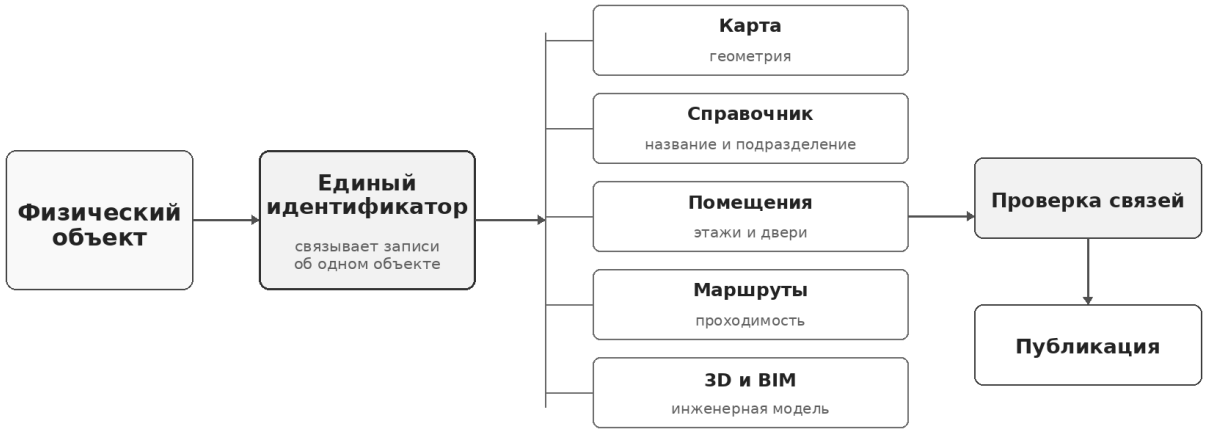


Рис. 4. Связь представлений одного физического объекта

Распределение данных между представлениями физического объекта, источники их обновления и использование в ГИС приведены в табл. 2. Таблица показывает, какие сведения сохраняются в профильных источниках и как они используются средствами ГИС.

Табл. 2. Представления объекта и источники обновления

Представление	**Какие сведения содержит**	**Кто обновляет**	**Как используется в ГИС**
Карта	Геометрия, координаты, тематический слой	Картографический источник	Поиск, отображение и пространственные запросы
Справочник	Название, подразделение, адрес, служебные атрибуты	Ответственное подразделение	Поиск по официальным сведениям
Внутренние пространства	Этажи, помещения, двери, переходы	Владелец планов и инженерных данных	Работа с помещениями и навигация внутри зданий
Маршруты	Дороги, проходы, входы, внутренние переходы	Маршрутный сервис	Маршрут по территории и внутри зданий
3*D* и *BIM*	Геометрия и инженерная модель	Проектные и инженерные системы	3*D*-визуализация и инженерная интеграция

Для связанных данных в методологии выделены семь условий согласованности (табл. 3), охватывающих однозначность идентификации физического объекта, существование ссылок на профильные источники, связность маршрутов, внутреннюю топологию, происхождение и версии сведений, а также независимость обновления источников.

Табл. 3. Правила согласования связанных данных

Связь	**Условие согласованности**	**Практический смысл**
Идентификатор объекта	Один устойчивый идентификатор соответствует одному физическому объекту	Все представления объекта сохраняют связь после обновлений
Ссылка на источник	Связанная запись существует в профильной системе	Карточка, помещение и инженерная модель сохраняют привязку к объекту
Вход в здание	Вход связан с соответствующим зданием, а его пространственное положение согласовано с геометрией здания	Маршрут корректно переходит с территории внутрь здания

Связь	Условие согласованности	Практический смысл
Маршрут	Для входов, помещений и переходов заданы связи, необходимые для построения маршрута	Путь продолжается до выбранного помещения
Внутренние пространства	Помещение связано со зданием и этажом, а двери и вертикальные переходы – с маршрутным графом	Поэтажная модель пригодна для поиска и навигации
Источник и версия	Для изменяемых сведений известны источник и версия	Можно установить происхождение опубликованного значения
Независимое обновление	Изменение одного источника не удаляет сведения другого	Справочник, карта, маршруты и модели обновляются независимо

Эти условия фиксируют, какие связи должны сохраниться после обновления данных. На них опираются прикладные сервисы, которым требуется согласованное представление здания, помещения, входа, маршрута или инженерной модели.

Пользовательский просмотр и профессиональное редактирование реализованы как отдельные сценарии. Пользовательская карта использует веб-картографическую библиотеку *MapLibre GL JS*, векторные тайлы и программные стили [50]. В редакторе сохранена библиотека *Leaflet*, используемая для работы с ограниченным набором объектов и изменения геометрии [51]. Оба клиента работают с общей предметной моделью ГИС и могут развиваться независимо. На рис. 5 показан основной режим просмотра.

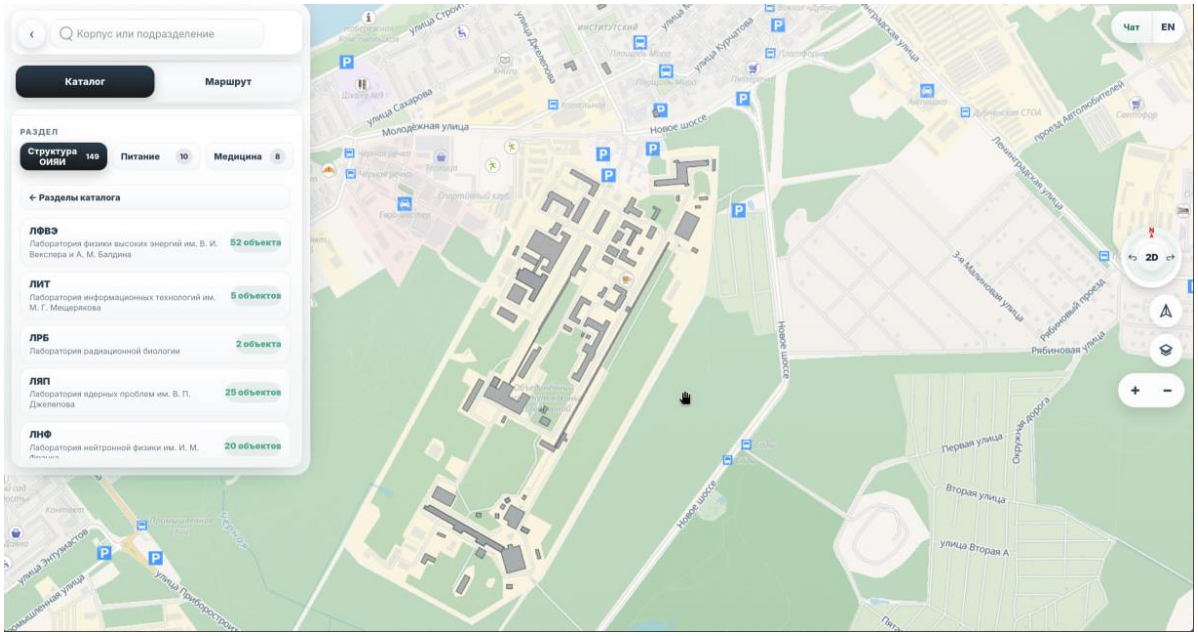


Рис. 5. Основной режим просмотра территории ОИЯИ

В качестве базовой картографии пользовательского интерфейса используется зафиксированный срез открытых данных *OpenStreetMap* с соблюдением условий лицензии [52].

На рис. 6 показана архитектура ГИС ОИЯИ в составе Цифровой экосистемы. Клиентские и прикладные сервисы взаимодействуют с пространственным ядром через сервисный слой ГИС, включающий каталог, *API*, публикацию карт, маршрутизацию и управление доступом. Пространственное ядро на *PostGIS* хранит единые идентификаторы объектов, пространственные связи, сведения о версиях и происхождении данных, а также результаты проверок согласованности. Справочники ЦЭС, планы помещений, маршрутный граф и инженерные данные подключаются к ядру как профильные источники. Такая архитектура позволяет независимо развивать веб-карту, редактор,

мобильный интерфейс, 3*D*/*BIM*-компоненты и сервис резервирования при сохранении общей модели физической инфраструктуры.



Рис. 6. Архитектура ГИС ОИЯИ в составе Цифровой экосистемы

Карточка объекта связывает положение на территории со справочными сведениями и дополнительными представлениями. На рис. 7 к зданию привязана 3*D*-модель. Она загружается по запросу пользователя и хранится как отдельное инженерное представление.

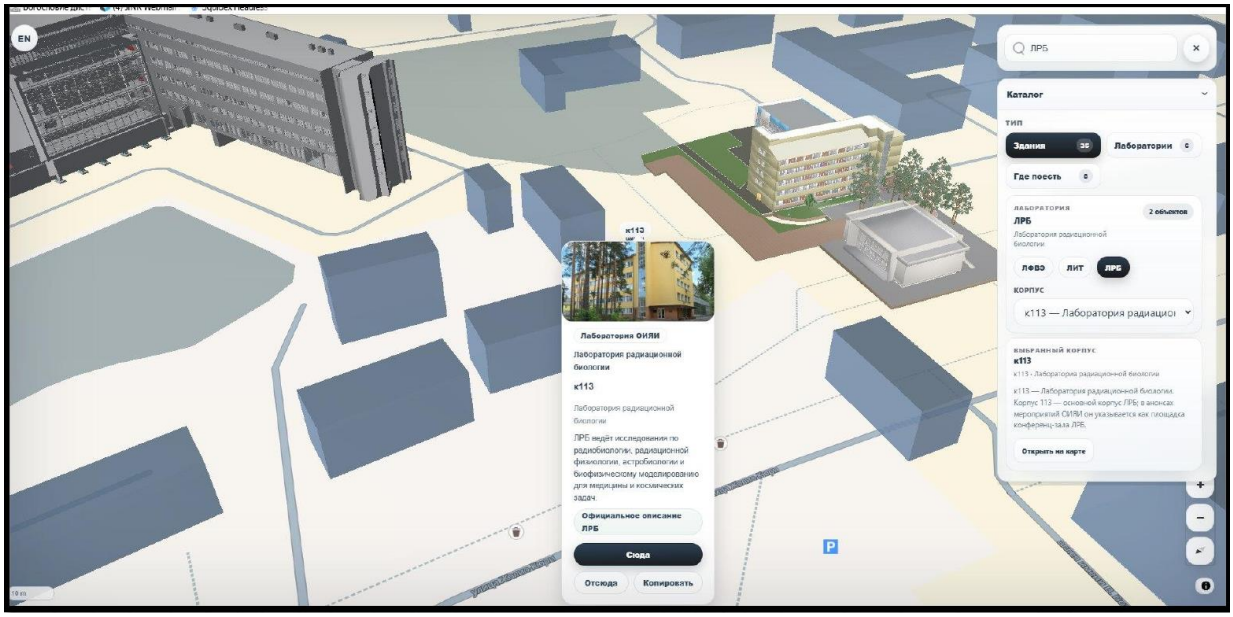


Рис. 7. Карточка объекта и геопривязанная трёхмерная модель

Маршрутизация реализована как отдельный сервис. Для построения маршрутов по территории Института используется маршрутный движок *Valhalla* [53], а внутри зданий путь прокладывается на основе собственного графа помещений, дверей и межэтажных переходов, связанного с каталогом. Пользователь видит один маршрут от точки на территории до нужного помещения. На рис. 8 показан участок маршрута по территории.



Рис. 8. Построение маршрута по территории ОИЯИ

Мобильный режим реализован как прогрессивное веб-приложение (*Progressive Web App, PWA*) и использует ту же картографическую основу и прикладные сервисы, что и основная версия системы, адаптируя интерфейс к устройствам с небольшим экраном. Его применение позволяет пользователю строить и корректировать маршрут непосредственно в процессе перемещения по территории Института, а также использовать текущее местоположение в качестве начальной точки маршрута. Элементы управления и отображения карты адаптированы для сенсорного взаимодействия и компактного представления информации. На рис. 9 показаны определение местоположения пользователя и выбор начальной и конечной точек маршрута.

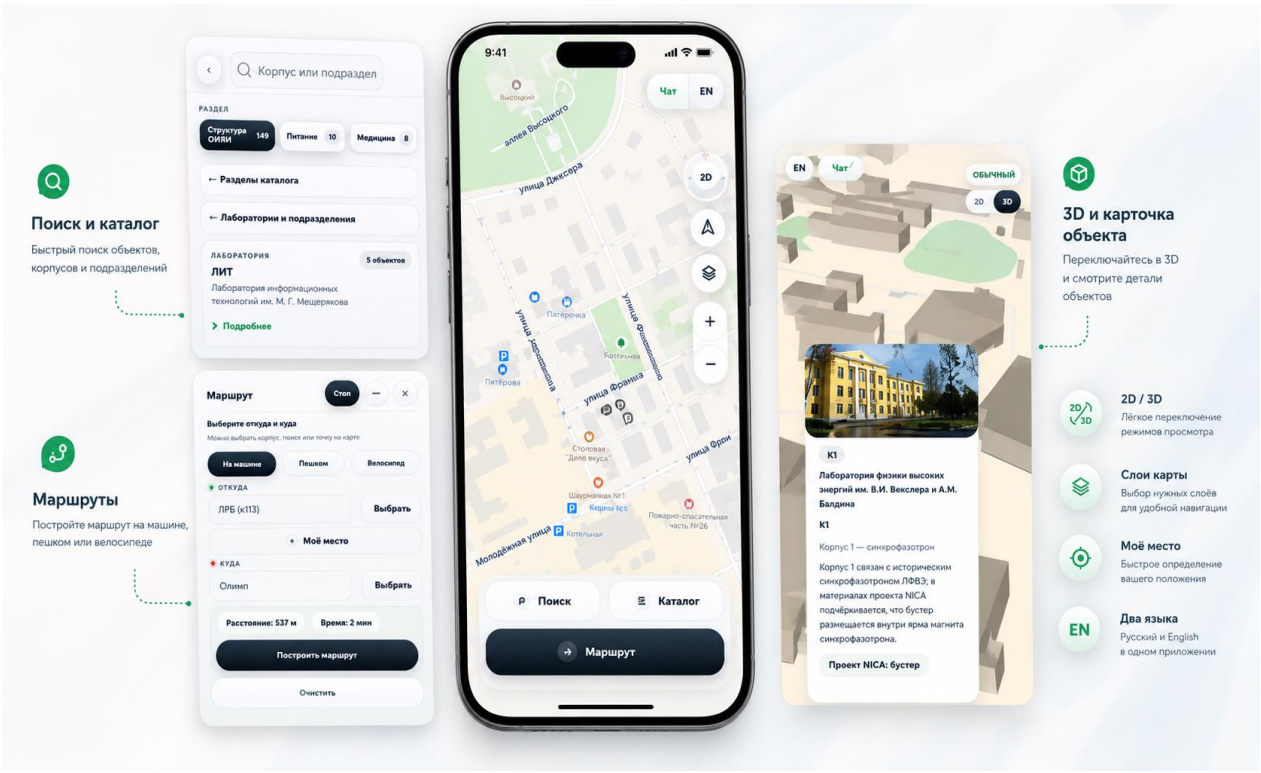


Рис. 9. Геолокация и выбор маршрута в мобильном интерфейсе

Редактор вынесен в отдельное рабочее место, поскольку пользователю карты не требуются функции изменения пространственных и атрибутивных данных. Ответственный сотрудник может

создавать новые объекты и сохранять изменения в виде черновика, не отображаемого в опубликованной версии карты до завершения проверки. В редакторе можно изменять атрибуты объекта и его геометрию, включая положение, контур и другие пространственные характеристики в зависимости от типа объекта. После внесения изменений запись может быть направлена на проверку и, после согласования, опубликована. Такой подход позволяет отделить процесс подготовки и верификации данных от их отображения конечным пользователям. На рис. 10 показано рабочее место редактора, в котором карта совмещена с каталогом объектов.



Рис. 10. Рабочее место редактирования пространственных объектов

Пространственные данные ГИС хранятся в *PostgreSQL* с расширением *PostGIS*, пространственные индексы и геометрические операции которого используются для поиска и подготовки картографических представлений [54]. Разделение черновых и опубликованных состояний задаётся прикладной логикой ГИС, а транзакционный механизм *PostgreSQL* обеспечивает согласованное применение связанных изменений [55]. При необходимости стандартная картографическая публикация может быть вынесена в отдельный геосервер без изменения идентификаторов объектов и связей между ними.

Внутренняя маршрутизация реализована на отдельном графе, описывающем топологические связи между этажами, помещениями, дверями и вертикальными переходами – лестницами, лифтами и другими элементами перемещения между этажами. Для одного здания в базе данных представлены шесть этажей, 314 помещений, 318 дверных объектов и 15 вертикальных связей, обеспечивающих переход между соответствующими участками разных этажей. Узлы графа связаны с идентификаторами помещений и входов, благодаря чему маршрут, построенный по территории Института, может быть продолжен внутри здания до требуемого помещения без повторного выбора объекта назначения. Такое представление соответствует принципу явного описания топологии внутренних пространств в стандарте *OGC IndoorGML* [56] и общему подходу к объединению сетей маршрутизации на территории и внутри зданий [57].

С внутренними пространствами связан сервис резервирования помещений для сотрудников. Помещение в ГИС и соответствующая запись в сервисе резервирования имеют общий идентификатор, благодаря чему пользователь может перейти к резервированию непосредственно из пространственного представления помещения. ГИС передаёт идентификатор и связанный с ним пространственный контекст, тогда как сведения о состоянии резервирования хранятся и изменяются в профильном сервисе. Такое разделение позволяет не создавать в ГИС самостоятельный справочник резервируемых

помещений, поскольку ответственность за сведения о резервировании сохраняется за профильным сервисом. В данном сценарии ГИС связывает физическое помещение, его пространственное представление и процесс резервирования через общую систему идентификаторов.

Инженерная часть ГИС включает две геопривязанные 3*D*-модели, связанные с теми же идентификаторами объектов, которые используются картой, каталогом и маршрутами. В текущей реализации 3*D*-модель является отдельным представлением физического объекта. Исследования *BIM*/*GIS*-интеграции указывают на различия в представлении, масштабе и потоках данных между этими системами [58]. Двусторонний обмен *BIM*/*GIS*-данными, согласование версий инженерных элементов и расширение пространственных запросов по *BIM*-данным относятся к дальнейшему развитию системы.

Совокупность реализованных сервисов показывает, что ГИС ОИЯИ уже не сводится к отдельному картографическому приложению. Карта, модели внутренних пространств, маршруты, 3*D*-представления и сервис резервирования помещений используют общую систему идентификаторов, благодаря чему различные пользовательские и профессиональные сценарии обращаются к одним и тем же физическим объектам. Профильные системы при этом сохраняют ответственность за собственные сведения и могут обновлять их независимо. В результате ГИС формирует устойчивый пространственный контекст Цифровой экосистемы, связывающий цифровые сервисы с физической инфраструктурой Института.

6. Интеллектуальные сервисы на основе пространственного контекста

В предлагаемой архитектуре пространственный интеллект опирается на пространственный контекст, уже поддерживаемый ГИС. Его основу составляют устойчивые идентификаторы физических объектов, связи между их цифровыми представлениями и доступные пространственные операции. Языковая модель рассматривается как один из возможных компонентов этой архитектуры, но не как замена пространственным вычислениям. Современные исследования показывают, что большие языковые модели способны работать с географической семантикой, однако испытывают затруднения при явном рассуждении над геометрией и топологическими отношениями [59]. В работе [60] гибридный подход *Hybrid Mind*, объединяющий языковую модель с детерминированными алгоритмами ГИС, правильно решил 70,48% заданий, тогда как лучшая из протестированных автономных языковых моделей правильно решила менее четверти заданий. Этот результат используется для обоснования разделения функций и не рассматривается как оценка ГИС ОИЯИ. В соответствии с этим разделением языковая модель интерпретирует пользовательский запрос и выбирает требуемую операцию, а вычисления над геометрией, топологией и маршрутами выполняются средствами ГИС.

Дальнейшее развитие пространственного интеллекта связано с использованием базы знаний и пространственного помощника на основе существующей модели объектов и операций ГИС. База знаний должна дополнить сведения о зданиях и помещениях документальным и предметным контекстом с сохранением связей с исходными корпоративными источниками и действующей ролевой моделью доступа. Пространственный помощник сможет обращаться к тем же объектам и отношениям, не создавая собственной системы их идентификации. Работы по *GIS Copilot* и автономным ГИС-агентам показывают возможность связывать пользовательский запрос с последовательностью пространственных операций [22, 23], тогда как результаты *GeoAnalystBench* указывают на зависимость качества таких последовательностей от используемой модели и сложности задачи [24]. На рис. 11 приведён опытный образец интерфейса пространственного помощника ОИЯИ. База знаний и интерфейс пространственного помощника относятся к дальнейшему развитию системы. Их функциональная и экспериментальная оценка выходит за рамки настоящей работы.

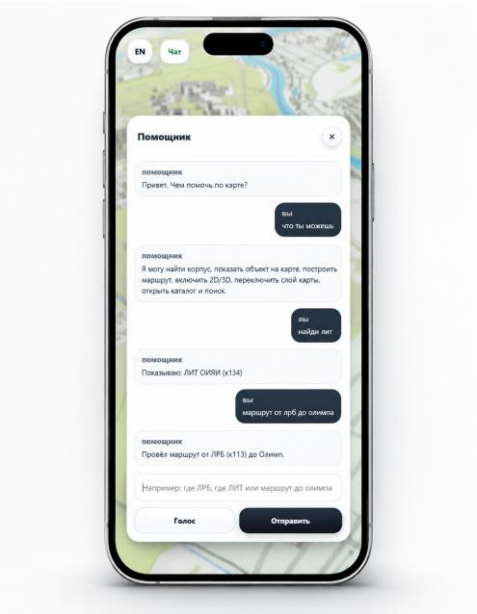


Рис. 11. Опытный образец интерфейса пространственного помощника ОИЯИ

7. Обсуждение и область применимости методологии

Сходные задачи рассматриваются в исследованиях цифровых двойников и общих сред данных. Систематический обзор цифровых двойников от уровня здания до города выделяет управление разнородными источниками как одну из ключевых проблем при масштабировании и рассматривает общую среду данных как средство организации таких источников [61]. Федеративный подход к цифровым двойникам развивает эту линию через построение согласованной открытой модели данных, объединяющей представления разных дисциплин [62]. Обзор городских цифровых двойников рассматривает интеграцию данных на этапах создания, использования и последующего обновления в течение жизненного цикла [63]. Эти исследования помещают рассматриваемую задачу в более широкий контекст интеграции разнородных данных. В постановке ОИЯИ к ней добавляется необходимость связать территорию, помещения, маршруты, инженерные представления и корпоративные сервисы через общий пространственный контекст.

Специфика предлагаемой методологии состоит в выборе физического объекта в качестве единицы интеграции. Методология предусматривает сохранение устойчивого идентификатора физического объекта, его пространственных отношений, а также сведений о происхождении и версиях связанных представлений. Профильные системы при этом сохраняют собственные данные и ответственность за их обновление. Предлагаемый подход проиллюстрирован реализацией ГИС ОИЯИ, в которой различные пользовательские и инженерные сценарии используют общую систему идентификаторов и пространственных связей, а исходные сведения сохраняются в профильных системах. Перенос методологии на другие научные центры требует отдельной проверки, поскольку состав источников, режимы доступа и распределение ответственности могут отличаться.

Методологический уровень настоящей работы задаёт общую архитектурную рамку и оставляет алгоритмические и экспериментальные вопросы для самостоятельных исследований. К ним относятся совершенствование алгоритмов маршрутизации по территории и внутри зданий и оценка их качества, развитие моделей ограничений и стоимости пути, синхронизация и версионирование *BIM*/*GIS*-данных, сравнительная оценка клиентских, серверных и маршрутных компонентов, развитие пространственной базы знаний и экспериментальная оценка геоинформационных агентов. Для каждого из этих направлений требуется самостоятельная постановка задачи и процедура экспериментальной оценки.

Заключение

Основной научно-методический результат работы состоит в разработке объектно-центрической модели федерации пространственных данных применительно к цифровой инфраструктуре научного

центра. В этой модели устойчивой единицей интеграции является физический объект, которому независимо от конкретного цифрового представления и прикладной технологии соответствует устойчивый идентификатор. Профильные системы продолжают отвечать за собственные сведения, тогда как ГИС связывает карту территории, внутренние пространства, маршруты, инженерные представления и прикладные сервисы через общие идентификаторы и пространственные отношения. Благодаря этому ГИС рассматривается как институциональная пространственная инфраструктура, связывающая цифровую экосистему с физической средой научного центра.

Основные положения предложенной методологии реализованы в ГИС ОИЯИ через набор взаимосвязанных компонентов, включающий карту, каталог и поиск, редактор, маршрутизацию по территории и внутри зданий, мобильный интерфейс, 3*D*/*BIM*-представления, программные интерфейсы и интеграцию с сервисом резервирования. Эти компоненты используют общую систему идентификаторов и пространственных связей, тогда как исходные сведения сохраняются и обновляются в профильных системах. Тем самым реализация ГИС ОИЯИ иллюстрирует применение объектно-центрической федерации в нескольких пользовательских и инженерных сценариях одной цифровой экосистемы.

Сформированный пространственный контекст создаёт основу для дальнейшего развития пространственного интеллекта Цифровой экосистемы. База знаний, аналитические модули и цифровые помощники могут использовать уже существующие объекты, связи и пространственные операции, не заменяя профильные системы и не дублируя их ответственность за данные. Роль ГИС при таком развитии определяется сохранением согласованного пространственного контекста по мере появления новых цифровых сервисов. Проверка алгоритмов маршрутизации, развитие механизмов *BIM*/*GIS*-обмена, оценка интеллектуальных компонентов и сравнительный выбор прикладных технологий остаются самостоятельными направлениями дальнейших исследований.

Список источников

1. Experiments // Объединенный институт ядерных исследований: [официальный сайт]. Joint Institute for Nuclear Research, 2016 – 2026. URL: https://www.jinr.ru/science-en/experiments/ (дата обращения: 07.07.2026).
2. Geographic Information System (GIS) // CERN. CERN, 2026. URL: https://sce-dep.web.cern.ch/knowledge-centre/geographic-information-system-gis/ (дата обращения: 11.08.2026).
3. JINR Digital Ecosystem launched in test mode // Объединенный институт ядерных исследований: [официальный сайт]. Joint Institute for Nuclear Research, 2016 – 2026. URL: https://www.jinr.ru/posts/jinr-digital-ecosystem-launched-in-test-mode/. Опубликовано 30.03.2023.
4. Digital JINR Ecosystem presented at CP JINR// Объединенный институт ядерных исследований: [официальный сайт]. Joint Institute for Nuclear Research, 2016 – 2026. URL: https://www.jinr.ru/posts/digital-jinr-ecosystem-presented-at-cp-jinr/. Опубл. 23.12.2022.
5. Geographic Information Science and Systems / P. A. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire, D. W. Rhind. 4th ed. Wiley, 2015. 496 p.
6. Devogele T., Parent C., Spaccapietra S. On Spatial Database Integration // International Journal of Geographical Information Science. 1998. Vol. 12, No. 4. P. 335-352. https://doi.org/10.1080/136588198241824.
7. Using Ontologies for Integrated Geographic Information Systems / F. T. Fonseca, M. J. Egenhofer, P. Agouris, G. Câmara // Transactions in GIS. 2002. Vol. 6, No. 3. P. 231-257. https://doi.org/10.1111/1467-9671.00109.
8. Haggett P. Locational Analysis in Human Geography. London: Edward Arnold, 1965. 339 p.
9. Berry B. J. L., Marble D. F. Spatial Analysis: A Reader in Statistical Geography. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1968. 512 p.
10. Tobler W. R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region // Economic Geography. 1970. Vol. 46, Suppl. 1. P. 234-240. https://doi.org/10.2307/143141.

11. Integrating GIS and Spatial Data Analysis: Problems and Possibilities / M. F. Goodchild, R. P. Haining, S. Wise [et al.] // International Journal of Geographical Information Systems. 1992. Vol. 6, No. 5. P. 407-423. https://doi.org/10.1080/02693799208901923.

12. Anselin L., Getis A. Spatial Statistical Analysis and Geographic Information Systems // The Annals of Regional Science. 1992. Vol. 26. P. 19-33. https://doi.org/10.1007/BF01581478.

13. Goodchild M. F. Geographical Information Science // International Journal of Geographical Information Systems. 1992. Vol. 6, No. 1. P. 31-45. https://doi.org/10.1080/02693799208901893.

14. Тарасов В. Б. Искусственный интеллект: от психоники и прикладной семиотики к синергетическому подходу. О научном наследии профессора Д. А. Поспелова // Развитие вычислительной техники в России, странах бывшего СССР и СЭВ: история и перспективы: Труды Пятой международной конференции SoRuCom-20 (6 –7 октября 2020 г., Москва). Москва: МИЭТ НИУ «ВШЭ», 2020. С. 296–303.

15. Кандрашина Е. Ю. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах / Е. Ю. Кандрашина, Л. В. Литвинцева, Д. А. Поспелов; под ред. Д. А. Поспелова. Москва: Наука, 1989. 328 с. ISBN 5-02-014096-1.

16. Smith T. R. Artificial Intelligence and Its Applicability to Geographical Problem Solving // The Professional Geographer. 1984. Vol. 36, No. 2. P. 147-158. https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1984.00147.x.

17. Couclelis H. Artificial Intelligence in Geography: Conjectures on the Shape of Things to Come // The Professional Geographer. 1986. Vol. 38, No. 1. P. 1-11. https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1986.00001.x.

18. Openshaw S. Some Suggestions Concerning the Development of Artificial Intelligence Tools for Spatial Modelling and Analysis in GIS // The Annals of Regional Science. 1992. Vol. 26, No. 1. P. 35-51. https://doi.org/10.1007/BF01581479.

19. Frank A. U., Campari I., Formentini U. Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space. Berlin: Springer, 1992. 439 p. https://doi.org/10.1007/3-540-55966-3.

20. GeoAI: Spatially Explicit Artificial Intelligence Techniques for Geographic Knowledge Discovery and Beyond / K. Janowicz, S. Gao, G. McKenzie [et al.] // International Journal of Geographical Information Science. 2020. Vol. 34, No. 4. P. 625-636. https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1684500.

21. Towards the Next Generation of Geospatial Artificial Intelligence / G. Mai, Y. Xie, X. Jia [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2025. Vol. 136. Art. 104368. https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104368.

22. GIS Copilot: Towards an Autonomous GIS Agent for Spatial Analysis / T. Akinboyewa, Zh. Li, H. Ning, M. N. Lessani // International Journal of Digital Earth. 2025. Vol. 18, No. 1. Art. 2497489. https://doi.org/10.1080/17538947.2025.2497489.

23. An Autonomous GIS Agent Framework for Geospatial Data Retrieval / H. Ning, Zh. Li, T. Akinboyewa, M. N. Lessani // International Journal of Digital Earth. 2025. Vol. 18, No. 1. Art. 2458688. https://doi.org/10.1080/17538947.2025.2458688.

24. GeoAnalystBench: A GeoAI Benchmark for Assessing Large Language Models for Spatial Analysis Workflow and Code Generation / Q. Zhang, S. Gao, Ch. Wei [et al.] // Transactions in GIS. 2025. Vol. 29, No. 7. Art. e70135. https://doi.org/10.1111/tgis.70135.

25. SCE Technical Seminar: New Version of GIS Portal v3.0 / CERN. CERN, 2026. URL: https://indico.cern.ch/event/1645014/ (дата обращения: 26.08.2026).

26. Developing Campus Digital Twin Using Interactive Visual Analytics Approach / X. Ye, S. Jamonnak, S. Van Zandt [et al.] // Frontiers of Urban and Rural Planning. 2024. Vol. 2, No. 1. Art. 9. https://doi.org/10.1007/s44243-024-00033-2.

27. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Net Zero Labs Pilot: NREL Roadmap to Decarbonization. NREL/MP-6A42-82440. 2022. 32 p. URL: https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/82440.pdf (дата обращения: 26.08.2026).

28. IdroGEO: A Collaborative Web Mapping Application Based on REST API Services and Open Data on Landslides and Floods in Italy / C. Iadanza, A. Trigila, P. Starace [et al.] // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021. Vol. 10, No. 2. Art. 89. https://doi.org/10.3390/ijgi10020089.

29. Salleh S., Ujang U., Azri S. Virtual 3D Campus for Universiti Teknologi Malaysia (UTM) // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021. Vol. 10, No. 6. Art. 356. https://doi.org/10.3390/ijgi10060356.

30. Navigating MazeMap: Indoor Human Mobility, Spatio-Logical Ties and Future Potential / G. Biczók, S. Diez Martinez, T. Jelle, J. Krogstie // 2014 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PERCOM WORKSHOPS). 2014. P. 266–271. https://doi.org/10.1109/PerComW.2014.6815215.

31. Tahir R., Krogstie J. Impact of Navigation Aid and Spatial Ability Skills on Wayfinding Performance and Workload in Indoor-Outdoor Campus Navigation: Challenges and Design // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, No. 17. Art. 9508. https://doi.org/10.3390/app13179508.

32. Enterprise GIS System | Cloud-Native Geospatial Software. URL: https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-enterprise/overview (дата обращения: 11.08.2026).

33. Get started with Floor Plan Editor // ArcGIS Indoors : [Documentation]. URL: https://doc.arcgis.com/en/indoors/latest/floor-plan-editor/introduction-to-floor-plan-editor.htm (дата обращения: 11.08.2026).

34. NextGIS Web : [Documentation] // NextGIS. NextGIS, 2011-2026. URL: https://docs.nextgis.com/docs_ngweb/source/index.html (дата обращения: 11.08.2026).

35. Permission system in NextGIS Web // NextGIS Web : [Documentation]. NextGIS, 2011-2026. URL: https://docs.nextgis.com/docs_ngweb/source/permissions.html (дата обращения: 11.08.2026).

36. Справка для системы ГИС Панорама. Panorama Group, 1991 – 2026. URL: https://help.gisserver.ru/ (дата обращения: 11.08.2026).

37. QGIS Server Guide/Manual — QGIS Documentation. URL: https://docs.qgis.org/latest/en/docs/server_manual/ (дата обращения: 11.08.2026).

38. GeoServer 3.1 User Manual. GeoServer : GeoServer is an open source server for sharing geospatial data. URL: https://docs.geoserver.org/latest/en/user (дата обращения: 11.08.2026).

39. GeoNode Documentation. URL: https://docs.geonode.org/ (дата обращения: 11.08.2026).

40. MapStore : [Documentation] // GeoSolutions. URL: https://docs.mapstore.geosolutionsgroup.com/ (дата обращения: 11.08.2026).

41. What is the iTwin Platform? Bentley Systems, Incorporated. URL: https://developer.bentley.com/itwinplatform/ (дата обращения: 11.08.2026).

42. Overview. Deploy the full CARTO platform on your own infrastructure // CARTO Documentation. URL: https://docs.carto.com/carto-self-hosted/overview (дата обращения: 11.08.2026).

43. Precisely Help Center | Documentation. URL: https://help.precisely.com/ (дата обращения: 11.08.2026).

44. SuperMap iServer : [Documentation]. SuperMap Software Co.,Ltd., 2000-2026. URL: https://help.supermap.com/iPortal/en/ (дата обращения: 11.08.2026).

45. M.App Enterprise. M.App Enterprise, 2026. URL: https://mae.hexagon.com/ (дата обращения: 11.08.2026).

46. Google Maps Platform Documentation | Routes API // Google for Developers. URL: https://developers.google.com/maps/documentation/routes (дата обращения: 11.08.2026).

47. Policies and attributions for Routes API // Google Maps Platform Documentation URL: https://developers.google.com/maps/documentation/routes/policies (дата обращения: 11.08.2026).

48. Terms of Use | Yandex Maps API. URL: https://yandex.com/dev/tariffs/doc/en/jsapi/terms/ (дата обращения: 11.08.2026).

49. Maps API // 2GIS Documentation. 2GIS, 2026. URL: https://docs.2gis.com/en/on-premise-api-platform/architecture/api-platform/maps (дата обращения: 11.08.2026).

50. Introduction - MapLibre GL JS : [Documentation]. URL: https://maplibre.org/maplibre-gl-js/docs/ (дата обращения: 11.08.2026).

51. Leaflet - a JavaScript library for interactive maps. Volodymyr Agafonkin, 2010–2026. URL: https://leafletjs.com/ (дата обращения: 11.08.2026).

52. Copyright and License // OpenStreetMap. URL: https://www.openstreetmap.org/copyright (дата обращения: 11.08.2026).

53. Valhalla Docs : [documentation]. URL: https://valhalla.github.io/valhalla/ (дата обращения: 11.08.2026).

54. PostGIS . PostGIS PSC & OSGeo, 2023. URL: https://postgis.net/ (дата обращения: 11.08.2026).

55. PostgreSQL: Documentation. The PostgreSQL Global Development Group, 1996-2026. URL: https://www.postgresql.org/docs/ (дата обращения: 11.08.2026).

56. OGC IndoorGML 2.0 Part 1. Conceptual Model / Open Geospatial Consortium. Open Geospatial Consortium, 2025. URL: https://docs.ogc.org/is/22-045r5/22-045r5.html (дата обращения: 11.08.2026).

57. Claridades A. R. C., Lee J. Defining a Model for Integrating Indoor and Outdoor Network Data to Support Seamless Navigation Applications // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021. Vol. 10, No. 8. Art. 565. https://doi.org/10.3390/ijgi10080565.

58. Zhu J., Wu P. BIM/GIS Data Integration from the Perspective of Information Flow // Automation in Construction. 2022. Vol. 136. Art. 104166. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104166.

59. Foundation Models for Geospatial Reasoning: Assessing the Capabilities of Large Language Models in Understanding Geometries and Topological Spatial Relations / Y. Ji, S. Gao, Y. Nie [et al.] // International Journal of Geographical Information Science. 2025. Vol. 39, No. 9. P. 1866-1903. https://doi.org/10.1080/13658816.2025.2511227.

60. Evaluating and Enhancing Spatial Cognition Abilities of Large Language Models / A. Yang, C. Fu, Q. Jia [et al.] // International Journal of Geographical Information Science. 2025. Vol. 39, No. 9. P. 2009-2044. https://doi.org/10.1080/13658816.2025.2490701.

61. Common Data Environment for Digital Twins from Building to City Levels / J. Yan, Q. Lu, N. Li [et al.] // Automation in Construction. 2025. Vol. 174. Art. 106131. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106131.

62. Federated Data Modeling for Built Environment Digital Twins / N. Moretti, X. Xie, J. Merino Garcia [et al.] // Journal of Computing in Civil Engineering. 2023. Vol. 37, No. 4. Art. 04023013. https://doi.org/10.1061/JCCEE5.CPENG-4859.

63. Data Integration across Urban Digital Twin Lifecycle: A Comprehensive Review of Current Initiatives / I. Jeddoub, G.-A. Nys, R. Hajji, R. Billen // Annals of GIS. 2025. Vol. 31, No. 3. P. 367-386. https://doi.org/10.1080/19475683.2024.2416135.