

УДК 62.519; 629.127; 654.1; 656.6

На пути к когнитивным геоинформационным системам**Towards cognitive geographic information systems****Присяжнюк / Prisyazhnyuk S.**Сергей Прокофьевич
(office@itain.ru)доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ.ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
генеральный директор.
г. Санкт-Петербург**Храбан / Khraban A.**Александр Владимирович
(hraban@itain.spb.ru)ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
ведущий специалист.
г. Санкт-Петербург**Комашинский / Komashinsky V.**Владимир Ильич
(kama54@rambler.ru)

доктор технических наук.

ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
начальник отдела прикладных интеллектуальных
систем.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: когнитивный цикл – cognitive cycle; географическая информационная система – geographic information system; искусственный интеллект – artificial intelligence; машинное обучение – machine learning; интеллектуальная аналитика – intelligent analytics; гибридный интеллект – hybrid intelligence.

В статье рассмотрена концепция построения когнитивной ГИС (К-ГИС). Концепция включает обобщенную архитектуру когнитивного цикла ГИС, отличительной особенностью которого является применение пяти интеллектуальных аналитик, двух специализированных баз данных (для ГИС и для управления событиями), а также гибридного (человеко-машинного) интеллекта, координирующего работу всех элементов К-ГИС.

The article discusses the concept of building a cognitive GIS (C-GIS). The concept includes a generalized architecture of the cognitive GIS cycle, a distinctive feature of which is the use of five intelligent analytics, two specialized databases (for GIS and for event management), as well as hybrid (human-machine) intelligence that coordinates the work of all elements of the K-GIS.

Введение

Географические информационные системы (ГИС) быстро развиваются в течение последних десятилетий, при этом происходит постоянное улучшение технологий сбора, управления, анализа и визуализации геопространственных данных. Как известно [1], в ГИС интегрируются данные о местоположении

(географические данные) с описательной информацией (атрибутивными данными), что позволяет пользователям лучше понимать закономерности, отношения и тенденции в пространственном контексте. Быстрая эволюция ГИС была обусловлена несколькими этапами научного прогресса и технологических инноваций, включая персональные компьютеры, Интернет, высокопроизводительные и облачные вычисления. При этом ГИС всегда находились под влиянием соседних дисциплин, таких как когнитивная наука, информатика и искусственный интеллект (ИИ). В последнее время технологии ИИ находят все более широкое применение в ГИС, что открывает новые возможности для управления пространственными событиями на основе автоматического сбора, анализа, визуализации географических данных и автономного принятия пространственных решений.

Эволюция ГИС

Первая публикация, подробно описывающая использование компьютеров в картографии, была написана Уолдо Тоблером в 1959 году [2–4]. В 1960-е годы появилась первая Канадская географическая информационная система (CGIS), разработанная Роджером Томлинсоном, которого часто называют отцом ГИС. Первая CGIS работала на ламповых компьютерах, была предназначена для инвентаризации земель Канады и стала первой настоящей ГИС, способной хранить, анализировать и управлять огромными объемами географических данных (рис. 1).

Настольная ГИС относится к географической информационной системе, которая работает на одном компьютере или устройстве, не опираясь на внешние серверы или сети для поддержания основных функций. При этом программное обеспечение и данные хранятся локально, что позволяет пользователям решать различные задачи ГИС, такие как картографирование, анализ и управление данными без подключения к Интернету.

Распределенная ГИС относится к архитектуре, в которой такие компоненты, как данные, вычислительная мощность и сервисы децентрализованы, т. е. распределены по нескольким местоположениям и системам. Такой подход обеспечивает улучшенную масштабируемость, гибкость и совместную работу с приложениями ГИС в реальном масштабе времени за счет использования распределенных вычислительных ресурсов.

В облачных ГИС вместо установки и обслуживания программного обеспечения на локальных компьютерах пользователи получают доступ к ГИС-инструментам и данным через веб-браузеры или мобильные приложения, используя ресурсы облачной инфраструктуры.

Кибер-ГИС [5] – это концепция, объединяющая возможности географических информационных систем с киберфизическими системами. При этом предусматривается использование ГИС для моделирования, анализа и управления сложными, динамически изменяющимися системами, которые включают в себя как физические, так и цифровые компоненты.

Технологии ИИ ГИС [6–8] сформировались в результате интеграции искусственного интеллекта (ИИ) и технологий анализа пространственных данных (рис. 2.). Технология ИИ ГИС (часто называемая Geo AI) использует методы ИИ для решения различных географических проблем путем анализа пространственных данных и включает методы обнаружения

закономерностей, составления прогнозов, пространственно-временного прогнозирования и т. д.

Когнитивные ГИС (К-ГИС) предназначены для интеллектуального анализа географических данных, принятия решений и управления различного рода геопространственными событиями совместно с человеком или без его участия. Когнитивные ГИС могут адаптироваться к изменяющимся пространственным условиям, анализировать причины событий, происходящих в географическом пространстве, принимать основанные на постоянно обновляемых данных решения и управлять событиями, происходящими на географическом пространстве. Применение ИИ является ядром в принятии решений при разработке стратегий и шагов по управлению пространственными проблемами. В целом К-ГИС призвана искать и извлекать необходимые пространственные данные из различных источников, таких как онлайн-каталоги геопространственных данных. Кроме того, К-ГИС управляет сбором новых пространственных данных с наземных и спутниковых датчиков в масштабе времени, близком к реальному, а затем использует алгоритмы интеллектуального анализа данных, модели и инструменты ИИ для их обработки в интересах получения желаемых конечных результатов.

Концептуальные основы когнитивной ГИС

Когнитивная ГИС представляет собой новую парадигму интеграции ГИС с ИИ, датчиками пространственных данных и исполнительными устройствами, воздействующими на ход пространственных событий. Прототипом для К-ГИС стали когнитивные циклы, которые охватывают все внутренние процессы живых существ и ближайшие внешние процессы, которые влияют на их жизнедеятельность [9–10]. В отличие от биологических когнитивных систем, в которых задействована нервная система, обеспечивающая взаимодействие организма с внутренним и внешним миром

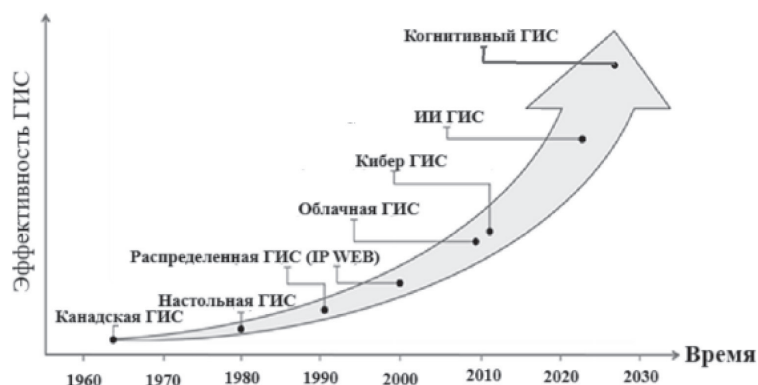


Рис. 1. Эволюция ГИС

через восприятие раздражителей, их анализ и организацию ответных реакций, в К-ГИС используются искусственные интеллектуальные когнитивные циклы (рис. 3), включающие сбор данных (больших географических данных), глубокий многоуровневый интеллектуальный анализ собранных данных (на основе применения методов описательной, диагностической прогностической и предписывающей аналитик), принятие решений (на основе применения методов решающей аналитики) и воплощение принятых решений (управление событиями) на географическом пространстве. Искусственный когнитивный цикл (как и биологический) может функционировать непрерывно или периодически повторяться с интервалом, задаваемым гибридным (человеко-машинным) пространственным интеллектом (рис. 2).

Технологии машинного обучения и ИИ обеспечивают работу всех элементов когнитивного цикла, выполняют аналитические функции и принимают решения в ответ на изменения в географическом пространстве, не полагаясь на заранее определенные правила или стратегии [11]. Эти возможности принятия и воплощения решений достигаются на основе применения интеллектуальной аналитики исторических и текущих пространственных данных, что дает огромные преимущества для управления пространственными событиями.

Машинное обучение и его применение в архитектуре когнитивного цикла К-ГИС

Машинное обучение – это цифровой мозг, который совместно с электронными цифровыми картами позволяет строить пространственный интеллект [12–17]. Конвергенция (неразрывное слияние) ГИС и машинного обучения позволяет не только видеть пространственные данные на карте, но и понимать их содержание, прогнозировать будущие состояния, принимать оптимальные решения и управлять пространствен-

ными событиями в масштабе времени, близком к реальному.

Применение МО большими базами данных ГИС

Для формирования больших баз данных ГИС (рис. 3) применяются различные методы МО, что значительно расширяет возможности по сбору контекстных данных. Задачи, которые решает машинное обучение при сборе данных для ГИС:

1. Автоматизация сбора данных от разнородных источников (рис. 4), таких как спутниковые снимки, аэрофотосъемка, LiDAR-данные и текстовые отчеты. При этом алгоритмы глубокого обучения (Deep Learning) могут использоваться для предварительной классификации объектов на изображениях (здания, дороги, растительность) без ручного вмешательства.

2. Позволяет существенно повысить качество данных ГИС, очищает и структурирует неупорядоченные географические данные, устраняет ошибки и заполняет пробелы.

3. Позволяет выявлять динамические изменения в геопространственных данных, что критично для мониторинга лесных пожаров, повреждений инфраструктуры после стихийных бедствий, несанкционированных изменений землепользования и т. д.

4. Обеспечивает интеграцию разнородных данных от разных источников (например, OpenStreetMap и спутниковые снимки) для создания комплексных моделей. Например, сверточные нейронные сети (CNN) могут сравнивать дорожные сети на картах и снимках, выявляя расхождения, а также обеспечивают анализ текстовых отчетов и их привязку к пространственным координатам.

Ключевыми алгоритмами МО, применяемыми при сборе данных в ГИС, являются: глубокое обучение для обработки изображений и облаков точек (например, архитектуры UNet, SSD), классификации и регрессии

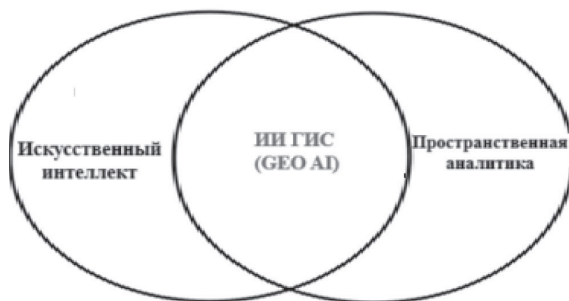


Рис. 2. Составные части технологии ИИ ГИС (GEO AI)

(например, SVM и случайный лес), обучение с подкреплением (применяется для адаптации моделей к изменяющимся условиям).

Применение МО в описательной аналитике ГИС

Описательная аналитика – это базовый уровень ГИС аналитики, цель которого заключается в том, чтобы понять, что произошло в геопространстве в прошлом или что происходит сейчас путем анализа и обобщения собранных пространственных данных. Машинное обучение играет важную роль в повышении качества описательной аналитики за счет автоматизации обобщения данных, выявления скрытых закономерностей и повышения точности выводов. Машинное обучение используется в описательной аналитике для решения таких задач, как:

1. **Автоматизированное обобщение и исследование данных** на основе генерации сводной статистики, такой как среднее значение, медиана, мода, дисперсия и стандартное отклонение для больших наборов данных. Кроме того, модели МО могут раскрывать сложные закономерности и тенденции в картографических данных, которые могут быть неочевидны при ручном анализе.

2. **Разработка и выбор признаков.** Машинное обучение может помочь определить наиболее важные переменные (признаки), которые способствуют пониманию результатов или тенденций, что позволяет проводить более целенаправленный анализ. Кроме того, алгоритмы МО могут генерировать новые признаки из существующих данных, более информативные для осуществления описательного анализа, например создания условий взаимодействия или агрегаций.

3. **Визуализация и исследование данных.** Машинное обучение позволяет создавать сложные визуализации, такие как диаграммы рассеяния, гистограммы и тепловые карты, что упрощает восприятие и понимание распределений и взаимосвязей данных. Машинное обучение также может поддерживать интерактивные панели мониторинга, которые упрощают пользователям исследование данных ГИС с разных точек зрения, и углубляться в конкретные области интересов.

4. **Обнаружение аномалий.** Алгоритмы МО могут также определять необычные географические явления или выбросы точек данных, которые могут указывать на ошибки или неожиданные события. При этом МО можно использовать для создания систем раннего оповещения, которые отмечают потенциальные проблемы на основе отклонений от установленных шаблонов.

5. **Улучшение традиционной аналитики.** Применение алгоритмов МО позволяет улучшить традиционные статистические методы, предоставляя более точные и содержательные результаты, особенно при работе со сложными или многомерными данными.

В целом описательная аналитика, основанная на МО, является фундаментом для осуществления последующих диагностической и прогностической аналитик, помогает строить более точные диагностические и прогностические модели на основе информации, полученной в результате описательного анализа.

Применение МО в диагностической аналитике ГИС

Диагностическая аналитика обеспечивает переход от знаний, полученных на этапе проведения описа-

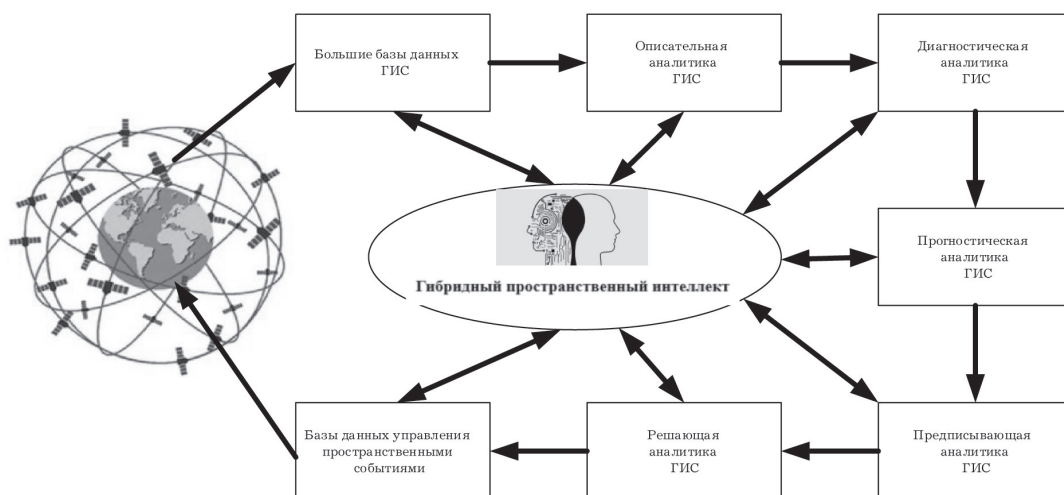


Рис. 3. Обобщенная архитектура когнитивного цикла К-ГИС

тельной аналитики, которая отвечает на вопрос «что случилось в географическом пространстве», к пониманию того, почему это случилось. Диагностическая аналитика – это ключевой этап преобразования данных в знания и действия. Она позволяет перейти от простой констатации фактов к глубокому пониманию движущих сил процессов, происходящих в географическом пространстве. Машинное обучение играет важную роль в диагностической аналитике ГИС, позволяя выявлять скрытые закономерности, аномалии и первопричины в данных, которые могут быть упущены при применении только традиционных методов, оно помогает лучше понять, почему происходят определенные события на географическом пространстве, путем анализа прошлых данных и выявления способствующих факторов.

Машинное обучение используется в диагностической аналитике для решения таких задач, как:

1. Выявление закономерностей и взаимосвязей. Для этого алгоритмы МО могут просеивать огромные объемы данных для обнаружения тонких закономерностей и взаимосвязей между различными переменными, предоставляя информацию об основных причинах событий, происходящих в географическом пространстве.

2. Анализ первопричин. Диагностическая аналитика, основанная на МО, позволяет углубляться в данные для того, чтобы точно определить первопричины проблем, возникших в географическом пространстве, анализируя исторические данные и выявляя ключевые факторы, способствующие этому. Алгоритмы МО могут помочь понять, почему произошли определенные события в географиче-

ском пространстве и как предотвратить подобные проблемы в будущем.

3. Улучшенное принятие решений. Благодаря более глубокому пониманию данных диагностическая аналитика на основе МО может дать возможность принимать более обоснованные и эффективные решения.

Ключевыми методами МО, применяемыми в диагностической аналитике, являются регрессионный анализ (используется для определения взаимосвязи между переменными и прогнозирования результатов), классификация (используется для категоризации данных по различным классам) и кластеризация (используется для группировки схожих точек географических данных).

Применение МО в прогнозной аналитике ГИС

Прогнозная аналитика призвана ответить на вопрос «Что вероятнее всего произойдет в будущем?», для этого используются результаты описательной и диагностической аналитики, а также исторические и текущие географические данные для построения моделей, предсказывающих будущие пространственные события с определенной вероятностью. Анализируя исторические данные, результаты описательной и диагностической аналитики, алгоритмы МО могут выявлять закономерности и взаимосвязи для прогнозирования будущих результатов с большей точностью и скоростью.

Машинное обучение используется в предиктивной аналитике для решения таких задач, как:

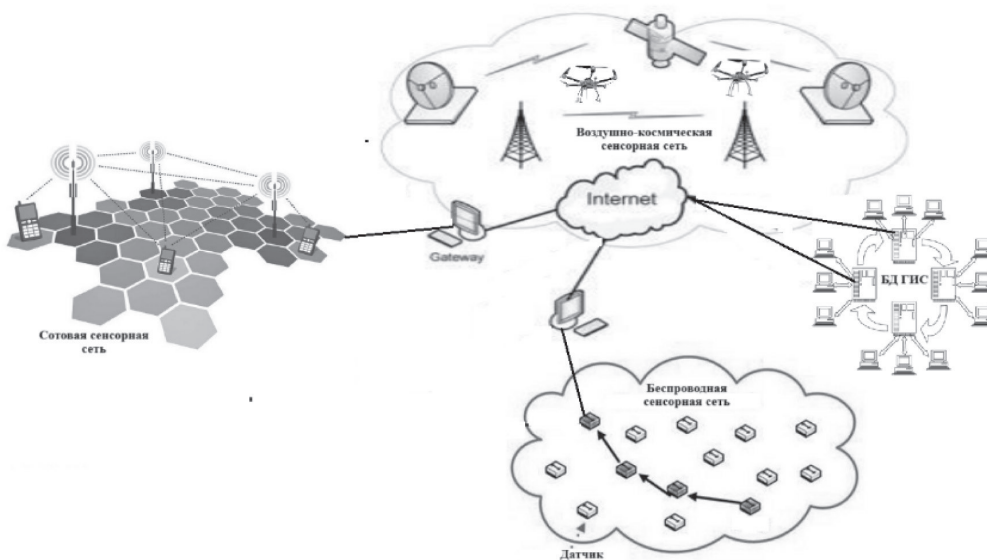


Рис. 4. Источники пространственных данных

1. *Повышение прогностических возможностей* ГИС на основе выявления сложных закономерностей, при этом алгоритмы МО могут анализировать большие, сложные наборы пространственных данных, чтобы выявлять скрытые закономерности и взаимосвязи, которые могут быть упущены при применении только традиционных методов. Обучаясь на данных, модели МО могут делать более точные прогнозы о будущих событиях, тенденциях или поведении, при этом автоматизируются процессы выявления закономерностей и составления прогнозов, делая их более быстрыми и масштабируемыми, чем ручные методы.

2. *Повышение точности прогнозов.* Применение алгоритмов МО позволяет повысить точность прогнозов, улучшить традиционные методы прогнозирования, особенно при работе со сложными или многомерными данными.

3. *Принятие проактивных решений.* Прогнозная аналитика подразумевает предвидение и понимание потенциальных пространственных проблем или новых пространственных возможностей и принятие мер до того, как они возникнут, а не реагирование на ситуации по мере их возникновения.

Ключевыми методами МО, применяемыми в прогностической аналитике, являются: регрессия, классификация, кластеризация, деревья решений и нейронные сети.

По сути, машинное обучение производит революцию в прогнозной аналитике, обеспечивая более точные, эффективные и проактивные идеи, которые могут способствовать принятию более качественных и эффективных решений.

Применение МО в предписывающей аналитике ГИС

Предписывающая аналитика ГИС применяет сложные алгоритмы машинного обучения, которые используют результаты описательной, диагностической, прогностической аналитики и текущие данные, чтобы предлагать оптимальные тактики и стратегии действий в географическом пространстве. Эти алгоритмы обычно используют такие методы, как оптимизация и моделирование в интересах принятия эффективных пространственных решений. Алгоритмы машинного обучения могут определять сложные закономерности и взаимосвязи в обширных наборах данных, которые могут быть упущены аналитиками-людьми. Затем эти закономерности используются для прогнозирования будущих результатов и потенциальных сценариев действий. Предписывающая аналитика использует машинное обучение для поиска наилучшего способа действий из ряда возможностей, оптимизируя их для достижения конкретных целей.

Машинное обучение используется в предписывающей аналитике для решения таких задач, как:

1. Имитация различных сценариев и прогнозирование влияния различных решений, позволяющая априорно тестировать потенциальные стратегии перед реализацией.

2. Основываясь на анализе, алгоритмы машинного обучения могут генерировать конкретные рекомендации по действиям, которые необходимо предпринять, предоставляя лицам, принимающим решения, возможность выбора с априорным учетом последствий.

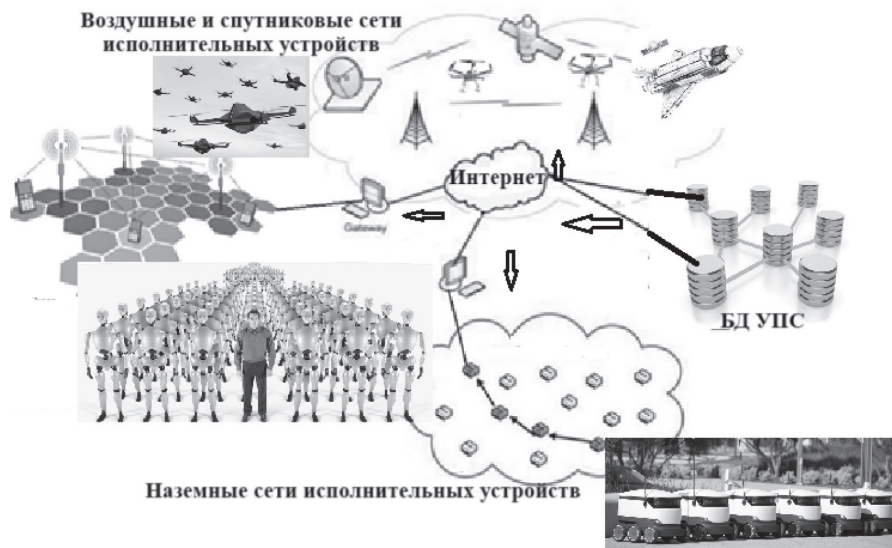


Рис. 5. Сети пространственно-распределенных исполнительных устройств

По сути, машинное обучение действует как мощный двигатель предписывающей аналитики, позволяя выходить за рамки простого понимания прошлых тенденций и прогнозирования будущих результатов и активно формировать будущее посредством информированного, проактивного предложения спектра решений.

Применение МО в решающей аналитике ГИС

Решающая аналитика используется при автономном режиме функционирования К-ГИС. Решающая аналитика в автономных режимах работы К-ГИС представляет собой процесс анализа пространственных данных, принятия пространственных решений и передачу команд на выполнение действий в географическом пространстве без постоянного вмешательства человека, только на основе применения алгоритмов искусственного интеллекта, машинного обучения и автоматизированной логики. Ключевыми аспектами решающей аналитики в автономных системах являются:

1. Автономность – система самостоятельно собирает, обрабатывает данные и принимает решения с минимальной зависимостью от внешнего управления.
2. Анализ данных в реальном времени на основе использования потоковой аналитики ГИС для мгновенной обработки данных с датчиков. Применение результатов предиктивной аналитики для прогнозирования событий.

4. Безопасность и надежность. Системы должны быть устойчивы к кибератакам и сбоям и поддерживать механизмы объяснимости для контроля решений.

Базы данных для управления пространственными событиями

Базы данных для управления пространственными событиями – это специализированные системы, которые позволяют хранить, обрабатывать и анализировать управляющие данные для управления исполнительными системами с географической привязкой (рис. 5).

Основными типами пространственных БД являются реляционные БД с пространственными расширениями (PostgreSQL с PostGIS, Oracle Spatial, Microsoft SQL Server с Spatial компонентами, IBM DB2 Spatial Extender), а также специализированные пространственные БД (GeoMesa, Rasdaman, SpaceTime Insight).

Ключевыми возможностями базы данных управления пространственными событиями являются поддержка 3D и 4D (время) данных, хранение геометрических объектов (точки, линии, полигоны), пространственные индексы для ускорения запросов, пространственные операции (пересечение, расстояние, объединение и др.), поддержка систем координат и проекций, анализ пространственных закономерностей, интеграция GIS-системами с исполнительными устройствами, выполняющими действия в физическом пространстве (робототехнические системы, устройства IoT, промышленные и транспортные системы

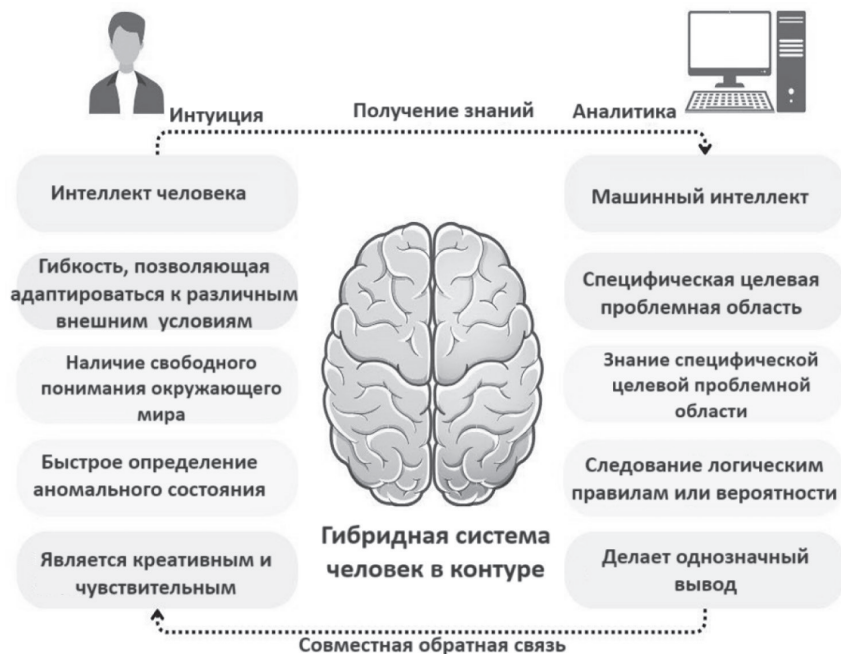


Рис. 6. Обобщенная модель гибридного интеллекта

и т. д.). База данных управления пространственными событиями может обеспечивать управление инфраструктурой умных городов, управление транспортом и логистикой, управление чрезвычайными ситуациями, защитой природы и управление территориями.

Гибридный пространственный интеллект ГИС

Гибридный человеко-машинный интеллект в К-ГИС (рис. 6) предназначен для решения комплексных пространственных задач, требующих синергии человеческой интуиции, креативности и этических суждений с вычислительной мощностью, скоростью обработки данных и алгоритмической точностью ИИ [18].

Ключевые задачи, решаемые гибридным интеллектом в К-ГИС:

1. *Принятие решений в условиях неопределенности* (решение сложных задач в динамичных средах с неполными или противоречивыми данными, где чисто алгоритмические методы недостаточны). При этом ИИ анализирует большие данные, а человек корректирует стратегию на основе интуиции и контекста. Недавние исследования показали, что гибридные системы на 15–20 % точнее в классификации сложных изображений, чем ИИ или человек по отдельности.

2. *Генеративный дизайн социо-пространственных систем* (проектирование комплексных систем, интегрирующих пространственные компоненты и человеческие ресурсы), при этом ИИ генерирует варианты дизайна на основе данных, а человек оценивает их реализуемость с учетом социальных факторов.

3. *Автоматизированное машинное обучение (AutoML) с «искусственной» логикой*, при этом ИИ автоматически комбинирует методы ML (нейросети, генетические алгоритмы и т. д.) для создания композитных моделей, а человек формулирует задачу и интерпретирует результаты в областях с высокими рисками.

4. *Метрологический анализ качества ИИ*, оценка надежности его решений в условиях неполных данных, где традиционная валидация недостаточна.

Таким образом, гибридный интеллект позволяет преодолевать ограничения «чистого» ИИ (негибкость, необъяснимость) и человека (когнитивные искажения, ограниченная память).

Самоорганизация в К-ГИС

Предполагается, что К-ГИС должна уметь автономно распределять ресурсы и действия для эффективного решения задач, включая время, вычислительные ресурсы, память и общение с пользователями. Для этого К-ГИС должна действовать как интеллектуальный менеджер, способный организовывать ресурсы и координировать действия, и направлять «команду» для решения сложных задач. Цель само-

организации отражает способность К-ГИС управлять внешними ресурсами и внутренними результатами, обеспечивая выполнение задач качественно и результативно, для этого модули, составляющие когнитивный интеллектуальный цикл (рис. 3) реализуют семь функций самоорганизации, таких как: самогенерация, самоисполнение, самообновление, самопроверка, саморазвитие, самоаналитика, самоуправление.

Самогенерация обеспечивает самостоятельный запуск выполнения новых задач. Самогенерация включает в себя создание гипотез, исследовательских идей, рабочих процессов геообработки, кода и аналитических сведений. Для успешного решения задач работы с данными автономная К-ГИС должна быть способна генерировать рабочие процессы обработки данных и соответствующие программы для их выполнения.

Самоисполнение. Автономная ГИС должна уметь действовать, достигая цели самоисполнения, что включает подготовку данных, выполнение рабочих процессов геообработки и, в конечном итоге, преобразование географических данных в результаты, содержащие числа, таблицы, карты или действия с использованием необходимых инструментов и ресурсов. Для достижения этой цели требуется соответствующая аппаратная и программная среда с достаточной функциональностью, необходимой для исполнения поставленных задач.

Самообновление – упорядочивание новых поступающих пространственных данных в соответствии с заданной логической последовательностью.

Самопроверка. Целью самопроверки является проверка результатов своих действий, включая операции с данными на каждом шаге и конечные результаты, гарантирующая, что каждая операция выполняется должным образом. Достижение этой цели включает в себя несколько ключевых компонентов, в том числе анализ рабочего процесса геообработки (проверка целесообразности сгенерированного рабочего процесса с учетом контекста задачи и текущих данных) и пошаговая верификация (проверка каждого шага, чтобы убедиться в их достоверности и снизить неопределенность рабочих процессов геообработки и управления пространственными событиями).

Саморазвитие. Предполагается, что К-ГИС будет развиваться самостоятельно, постоянно обучаясь на прошлых задачах, как успешных, так и неудачных, а также на внешних примерах. Это означает, что К-ГИС должна быть в состоянии улучшать пространственный анализ и моделирование на основе обобщения правил и обоснования своих действий, определяя необходимые знания или навыки, а также на основе обновления своих стратегий. Предполагается, что система будет выполнять задачи более эффективно с течением времени – быстрее, с большей точностью и с меньшим потреблением ресурсов. Она

также должна корректировать свои возможности, чтобы соответствовать изменениям задач, поставленным пользователем.

Самоаналитика – способность К-ГИС отслеживать, анализировать, интерпретировать и корректировать собственное внутреннее состояние. Это практический механизм повышения надежности, прозрачности, адаптивности и степени полезности К-ГИС.

Самоуправление (автономное управление) пространственными событиями – способность автономно контролировать, координировать и оптимизировать динамические процессы в географическом пространстве на основе анализа событий в реальном времени. Самоуправление в К-ГИС реализуется в результате интеграции самоаналитики, адаптивного планирования и исполнения, а также внутренней регуляции, обеспечивающей целенаправленные действия в сложном и изменчивом географическом пространстве.

Области применения К-ГИС

Области применения ГИС и К-ГИС стремительно расширяются, проникая практически во все сферы человеческой деятельности. Важнейшая особенность К-ГИС заключается в автономном сборе, обработке неструктурированных пространственных данных, обучении на ГИС данных, рассуждении, принятии и материализации пространственных решений, а также адаптации к пространственным изменениям (локальным, территориальным и глобальным). В частности, наиболее перспективными областями применения К-ГИС являются:

1. *Научные исследования и экологический мониторинг.* Система К-ГИС интегрирует разнородные данные (спутниковые снимки, сейсмические показатели, показатели датчиков загрязнения воздуха, климатические модели) для анализа природных процессов, прогнозирования пожаров, оценки экологических рисков. Применение в К-ГИС инструментов непосредственного управления пространственными событиями открывает широкие возможности для упреждающего реагирования на различного рода природные и антропогенные негативные влияния на природу и население.

2. *Управление критическими инфраструктурами* (национальными, региональными, городскими), такими как транспорт и логистика, телекоммуникации, электроэнергетика, строительство и добыча полезных ископаемых и т. д.

3. *Медицина и здравоохранение.* Когнитивные ГИС могут быть незаменимы при проведении эпидемиологического мониторинга и контроля заболеваний, прогнозировании вспышек заболеваний, осуществлении трекинга пандемий, распознавании по снимкам с БПЛА очагов размножения переносчиков болезней, управлении оптимальным размещением больниц и мобильных медицинских бригад с учетом плотности

населения, транспортной доступности и эпидемиологических рисков.

4. *Сельское и лесное хозяйства.* Анализ состояния почв, мониторинг и оперативное управление влажностью полей. Оперативное противодействие сельскохозяйственным вредителям. Отслеживание состояния и охрана лесов и лесных хозяйств, управление вырубкой и восстановлением лесов.

5. *Чрезвычайные ситуации и безопасность.* Моделирование паводков, лесных пожаров или землетрясений на основе интеллектуального анализа исторических данных и текущих показателей датчиков. Прогнозирование и упреждение чрезвычайных ситуаций и управление спасательными операциями, оценка ущерба в реальном масштабе времени.

6. *Политика и международные отношения.* Когнитивные ГИС могут стать ключевым инструментом в политическом анализе, дипломатии и обеспечении глобальной безопасности, они могут использоваться для прогнозирования социальных волнений и геопрограмной политической нестабильности, прогнозирования перемещения беженцев и координации гуманитарных миссий в реальном масштабе времени. Технологии К-ГИС позволяют выявлять скрытые паттерны, связывая географические факторы с политической и международной активностью.

7. *Военное дело.* Когнитивные ГИС революционизируют военную сферу, обеспечивая точность, аналитическую мощь и оперативность управления силами и оружием, они становятся ключевым элементом интеллектуальных систем управления войсками (ИСУВ).

Выводы

В статье рассмотрены концептуальные основы построения когнитивных, самоорганизующихся геоинформационных систем. В последующем предусматривается проведение более обширных исследований, посвященных динамическому и временному моделированию, составных частей К-ГИС и обеспечению их взаимодействия. При этом основные усилия должны быть направлены на исследование процессов функционирования гибридного человеко-машинного интеллекта в интересах лучшего понимания сложной геопрограмной динамики и эффективного адаптивного управления геопрограмными событиями. Развитие технологий К-ГИС в соответствии с обозначенными целями, уровнями и функциями открывает широкие возможности по управлению пространственными событиями различной размерности.

Литература

1. Комашинский, В. И. Геоинформационные системы в управлении и мониторинге техногенных объектов: учеб. пособие / В.И. Комашинский, А.Ю. Иванов, О.И. Пантюхин. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУТ, 2023. – 98 с.

2. Thirty Years of the Open Geospatial Consortium – History, Present, and Future / Y.-J. Chen, W. Li, L.-M. Losier [et al.]. – 2025. – URL : <https://eartharxiv.org/repository/view/8623/> (дата обращения: 21.08.2025).
3. Next-generation geospatial-temporal information technologies for disaster management / С.М. Albrecht, B. Elmegeen, O. Gunawan [et al.] // IBM Journal of Research and Development. – 2020. – Vol. 64, Iss. 1/2. – P. 5:1–5:12.
4. On the Opportunities and Challenges of Foundation Models for GeoAI (Vision Paper) / G. Mai, W. Huang, J. Sun [et al.] // ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems. – 2024. – Vol. 10, No. 2. – P. 1–46.
5. Wang, S. A CyberGIS Framework for the Synthesis of Cyberinfrastructure, GIS, and Spatial Analysis / S. Wang // Annals of the Association of American Geographers. – 2010. – Vol. 100, Iss. 3. – P. 535–557.
6. Janowicz, K. Philosophical Foundations of GeoAI: Exploring Sustainability, Diversity, and Bias in GeoAI and Spatial Data Science / K. Janowicz // Handbook of Geospatial Artificial Intelligence. – 2023. – P. 1–17.
7. Li, W. GeoAI: Where machine learning and big data converge in GIScience / W. Li // Journal of Spatial Information Science. – 2020. – No. 20. – P. 71–77.
8. GeoAI for Science and the Science of GeoAI / W. Li, S. Arundel, S. Gao [et al.] // Journal of Spatial Information Science. – 2024. – No. 29. – P. 1–17.
9. Anderson, J. R. Cognitive Psychology and Its Implications / J.R. Anderson. – New York : Seventh Edition, 2010. – 469 p.
10. Солсо, Р. Когнитивная психология / Р. Солсо. – Санкт-Петербург: Питер, 2006. – 589 с.
11. Zhang, Y. Using the OODA ring model to study the contribution of equipment to the system/ Y. Zhang, J. Huang // Modern defense technology. – 2017. – Vol. 45 (002). – P. 177–182.
12. GIScience in the Era of Artificial Intelligence: A Research Agenda Towards Autonomous GIS / Z. Li, H. Ning, S. Gao [et al.]. – 2025. – URL : <https://arxiv.org/abs/2503.23633> (дата обращения: 21.08.2025).
13. Концептуальные основы построения интеллектуальной системы управления чрезвычайными ситуациями / С.П. Присяжнюк, В.И. Комашинский, Д.Ф. Ткачев, В.И. Татарин // Информация и Космос. – 2025. – № 2. – С. 50–58.
14. Hsu, C.-Y. Geospatial foundation models for image analysis: Evaluating and enhancing NASA-IBM Prithvi's domain adaptability / C.-Y. Hsu, W. Li, S. Wang // International Journal of Geographical Information Science. – 2024. – Vol. 39, Iss. 9. – P. 2096–2125.
15. DeepSeek-V3 Technical Report / DeepSeek-AI, A. Liu, B. Feng [et al.]. – 2024. – URL : <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.19437> (дата обращения: 21.08.2025).
16. An LLM Agent for Automatic Geospatial Data Analysis / Y. Chen, W. Wang, S. Lobry, C. Kurtz. – 2024. – URL : <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.18792> (дата обращения: 21.08.2025).
17. Li, Z. Autonomous GIS: The next-generation AI-powered GIS / Z. Li, H. Ning // International Journal of Digital Earth. – 2023. – Vol. 16 (2). – P. 4668–4686.
18. Введение в теорию построения обучающих систем с дополненной интеллектуальностью / С.П. Присяжнюк, В.И. Комашинский, В.П. Чернолес [и др.] // Информация и Космос. – 2024. – № 4. – С. 76–87.