

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 630:330.4

ББК65.341+65.050.03

© Гулин К.А., Ригин В.А.

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РЕГИОНАЛЬНОГО ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА¹



ГУЛИН КОНСТАНТИН АНАТОЛЬЕВИЧ

Вологодский научный центр Российской академии наук

Россия, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а

E-mail: gil@vscc.ac.ru



РИГИН ВАСИЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

Вологодский научный центр Российской академии наук

Россия, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а

E-mail: var@vscc.ac.ru

В статье выполнен обзор развития геоинформационных технологий и методов агент-ориентированного моделирования, а также рассмотрены возможности интеграции данных технологий при построении имитационных моделей российскими и зарубежными исследователями. В статье представлен обзор возможностей современных геоинформационных технологий, выполнена оценка современного состояния методов дистанционного зондирования Земли и тематического картирования как основы для современных геоинформационных систем. Более подробно рассмотрены основные этапы развития распределенных геоинформационных систем, их основные преимущества в сравнении с настольными системами и выполнен обзор основных инструментальных средств для обработки и анализа пространственных данных. Определены основные преимущества веб-геоинформационных систем как результата интеграции веб-технологий и геоинформационных систем и их направления использования в лесном комплексе, представлена общая архитектура веб-ориентированной

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-06-00514 А).

геоинформационной системы регионального лесного комплекса. В заключительной части рассмотрены вопросы интеграции агент-ориентированного моделирования и геоинформационных систем, определены основные преимущества использования интеграции данных технологий, выявлены основные этапы построения агент-ориентированных моделей с использованием пространственных данных, проанализированы разработанные российскими и зарубежными исследователями агент-ориентированные модели, использующие геоинформационные системы. В результате удалось выявить различные уровни интеграции и определить ключевые проблемы использования пространственных данных геоинформационных систем в агент-ориентированных моделях.

Геоинформационные системы, агент-ориентированное моделирование, интеграция агент-ориентированных моделей и геоинформационных систем, региональный лесной комплекс.

Введение

Повышение эффективности работы любой социально-экономической системы, как правило, связано с совершенствованием процессов управления, причем системы с высокой степенью сложности требуют значительных затрат для их анализа и выработки необходимых рекомендаций, поэтому вероятность ошибки при этом достаточно высока. Возникает необходимость в моделировании систем такого рода для отработки принимаемых решений на уровне модели с проигрыванием возможных сценариев изменения внешней среды или внутренних структурных изменений модели самой исследуемой системы. Социально-экономические системы функционируют в определенном пространстве, имеющем несколько измерений, одно из которых – географическое, является важной составляющей информационного обеспечения процессов моделирования. Необходимые для моделирования пространственные данные становятся доступными для исследователей при использовании ГИС-технологий.

В современной экономике одними из наиболее востребованных природных ресурсов, наряду с углеводородами, являются лесные ресурсы, которые возобновляемы и несут значительную экологическую и рекреационную функцию. Значительная часть территории Российской Федерации покрыта лесами, поэтому актуальность развития и повышения эффективности управления

региональным лесным комплексом не вызывает сомнений, а с учетом экологической и социальной значимости для некоторых регионов России является одним из существенных компонентов социального пространства. Лесной комплекс в силу своих специфических особенностей (расположение ресурсной базы, наличие транспортных путей и экологической составляющей) имеет существенную привязку к географическим данным, поэтому использование ГИС-технологий при исследовании процессов, протекающих в лесной отрасли, является весьма существенным условием моделирования.

В данной статье ставится цель раскрыть основные тенденции развития ГИС-технологий, показать специфику и проблемы применения данных технологий в агент-ориентированном моделировании, а также выполнить краткий обзор российского и зарубежного опыта в применении ГИС-технологий при агент-ориентированном моделировании отдельных компонентов регионального лесного комплекса.

Геоинформационные технологии

Современные геоинформационные системы (ГИС) и технологии позволяют работать с большим количеством разнородных пространственных данных, полученных из различных источников. ГИС поддерживают различные аналитические функции для работы с пространственной (гео-) инфор-

мацией с возможностью наложения одних пространственных данных, представляющих реальные географические объекты, на другие. Геоинформационные технологии предоставляют рабочую среду и инструментарий для решения различных научных задач. Использование ГИС-технологий создает возможность проведения многофакторного анализа, применимого к значительным по площади территориям и позволяющего получить наглядные результаты. Но в то же время, необходимый уровень детализации по конкретным пространственным объектам невозможно получить без проведения разноплановых полевых исследований, результаты которых могут быть в дальнейшем сохранены и проанализированы в ГИС. Немаловажно отметить, что развитие современных ГИС-технологий связано с внедрением спутниковых систем навигации GPS, ГЛОНАСС, позволяющих определить местоположение объекта на поверхности Земли с необходимой точностью.

Важнейшую роль по развитию ГИС-технологий играет дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), осуществляемое авиационными и космическими средствами (спутники Landsat, Rapid Eye, Канопус), выполняющими фотосъемку поверхности Земли в различных спектральных диапазонах (радио-, ИК, видимый свет и пр.). Открытый доступ к архивной базе некоторых систем ДЗЗ и возможность работы с несколькими спектральными каналами в видимой и инфракрасной зоне спектра, а также высокий уровень пространственного разрешения и охват исследуемой территории способствовали широкому распространению и использованию данных ДЗЗ в научной среде. С помощью данных ДЗЗ возможно осуществить мониторинг за многочисленными процессами на Земле, такими как оценка и наблюдение за изменениями в атмосфере, мировом океане, пустынях, горных массивах, на полярных территориях, сельскохозяйственных землях и городских территориях.

На современном этапе средства и технологии дистанционного зондирования Земли стремительно развиваются: разрешение фотоснимков значительно повысилось, спектральный диапазон существенно расширился, точность пространственной привязки улучшилась, увеличивается количество запускаемых спутников. В результате этого вырос и объем накопленных пространственных данных. Это привело к тому, что централизованное хранение и обработка полученных спутниковых данных стали трудновыполнимыми, так как наблюдается существенное отставание методов и алгоритмов обработки данных от возможностей современных спутниковых сенсоров. Напротив, сложность современных программных систем, необходимость их поддержки в течение всего жизненного цикла и вытекающие отсюда затраты делают недоступным их использование для массового пользователя. Решение данной проблемы возможно при создании распределенных геоинформационных систем (РГИС) на базе крупных центров хранения и обработки пространственных данных, а также разработке интеграционных механизмов между ГИС-, веб- и грид-технологиями (распределенные вычисления на основе гетерогенных кластеров, объединенных в вычислительную сеть), что способствовало объединению разработчиков программного обеспечения в консорциумы по стандартизации. В результате был создан Консорциум открытых ГИС (Open Geospatial Consortium – OGC). Соответствие программного обеспечения различных разработчиков стандартам OGC обеспечивает необходимые алгоритмы взаимодействия различных программных систем для решения конкретных задач.

Современные ГИС можно разделить на три группы по архитектуре построения и функционалу (табл.), при этом следует учесть, что в зависимости от масштаба решаемых задач все представленные архитектуры ГИС могут быть успешно использованы в региональном лесном комплексе.

Таблица. Преимущества и недостатки различных типов ГИС

| Тип ГИС | Программная архитектура | Преимущества | Недостатки |
|--------------------|--|---|--|
| Настольные ГИС | Работает в пределах одного персонального компьютера (представление, анализ информации и база данных в одном приложении) | Осуществляет отображение, поиск, редактирование, обновление и анализ данных о географических объектах и связанную с ними атрибутивную информацию | Используется для решения локальных задач с небольшим объемом данных |
| Распределенные ГИС | Имеет сложную многоуровневую распределенную архитектуру, используются высокопроизводительные вычислительные системы: кластеры, суперкомпьютеры, грид-технологии | Используется при больших объемах данных, в рамках страны или мира, как правило, имеет несколько источников атрибутивных данных из различных систем, что позволяет решать более широкий круг задач на основе их интеграции | Повышенные требования к аппаратной части, используются высокопроизводительные вычислительные кластеры, архитектура программного обеспечения многоуровневая и сложная |
| Веб-ГИС | В базовом варианте имеет трехзвенную веб-архитектуру (браузер – веб-сервер – база данных), но может быть реализован и на основе многоуровневой архитектуры РГИС с реализацией клиентского уровня в виде веб-приложения | Обеспечивает широкий доступ к картографической информации посредством сети Интернет, в зависимости от системного окружения (Back-End) может решать различные по масштабу и сложности задачи | Используемый функционал ограничен возможностями доступных картографических веб-сервисов или закрытых специализированных систем, использующих данную технологию |

Источник: составлено автором.

Наибольший интерес на современном этапе развития вызывают распределенные ГИС и веб-ГИС. В отличие от настольных ГИС распределенные ГИС представляют собой картографическое приложение, построенное на основе многоуровневой архитектуры с выделением клиентского уровня (взаимодействие с пользователем, представление информации), уровня приложений (бизнес-логика, взаимодействие с другими приложениями или сервисами), уровня базы данных (доступ к пространственным данным, функции поиска, добавления, изменения данных). Как правило, все три уровня могут быть разделены еще на более узкие логические сегменты. Возможность такой распределенной архитектуры позволяет значительно увеличить производительность системы при обработке больших объемов данных (при использовании вычислительных кластеров или грид-технологий).

В отличие от настольных геоинформационных систем РГИС имеют следующие преимущества:

- распределенный доступ к системе (наличие веб-интерфейса, что значительно повышает доступность системы для широкого круга пользователей);

- распределенное хранение данных (единая точка доступа к распределенным данным с гетерогенной структурой);

- распределенная обработка данных (возможность обработки с использованием грид-технологий).

В качестве примеров РГИС можно привести следующие проекты: РГИС ГЕОСфера, разрабатываемая в Институте вычислительных технологий СО РАН, а также информационная система Центра коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН. Данные системы осуществляют сбор, хранение и обработку спутниковых данных для мониторинга территорий Сибири и Дальнего Востока.

В качестве базового инструментария для обработки и анализа пространственных данных используется пакет GRASS GIS (Geographic Resources Analysis Support System), который поддерживает основные типы пространственных данных, имеет мощный процессор обработки растровых данных и инструментарий для разработки модулей расширения. По своей функциональности данный пакет (GRASS GIS) не уступает аналогичным коммерческим продуктам [21].

Основные особенности пакета GRASS GIS [20]:

- для представления растровых данных используются воксели (3D-пиксели), что повышает эффективность обработки данных;
- разработка модулей расширения возможна практически на любых языках программирования (C/C++, Java и др.);
- доступ к различным СУБД;
- поддержка выполнения ресурсоемких алгоритмов на распределенных вычислительных системах.

Пакет GRASS GIS используется как основной прикладной пакет для обучения студентов и проведения научных исследований в университетах США и ЕС [8].

Развитие сети Интернет и доступность информационных и коммуникационных ресурсов для массового пользователя диктует следующие требования, предъявляемые к разрабатываемым технологическим решениям в области ГИС-технологий:

- своевременное обеспечение потребителя всей необходимой информацией для принятия решения;
- информация должна быть представлена в наглядной форме, подходящей для дальнейшего анализа;
- полученная информация должна быть актуальной;
- обеспечение открытого и свободного доступа к пространственной информации для массового пользователя (потребителя).

Применение данных установок на практике ведет к необходимости интеграции геоинформационных и веб-технологий, что реализуется в форме программного обеспечения типа веб-ГИС для представления, обработки и анализа пространственных данных [24]. Основой веб-ГИС являются новые веб-технологии (JavaScript, Ajax, JS-фреймворки), географические веб-сервисы, разработанные с поддержкой международных стандартов (WMS, WFS, WCS), в том числе системы для совместной обработки геопространственных данных (OpenStreetMap

и др.) [23] и сервисы доступа к данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также доступные программные интерфейсы для их использования в собственных разработках (REST API). Развитие данных средств разработки программного обеспечения привело к значительному росту количества картографических веб-приложений и геоинформационных интернет-систем (веб-ГИС).

Для реализации такого рода систем применяется вспомогательное программное обеспечение: как коммерческое, так и свободно распространяемое (СПО) с открытым исходным кодом (Open source) [22]. Так, например, в качестве средства разработки может быть использован специализированный комплекс MapGuide Open Source, предоставляющий необходимые средства формирования тематических карт и шаблонов веб-приложений, а также имеющий собственное хранилище пространственных данных с возможностью подключения внешних источников данных [5].

Использование современных ГИС-технологий существенно расширяет возможности информационных систем в различных сферах, особенно в тех системах, где объекты являются пространственными, то есть имеют конкретные географические координаты. Данные технологии успешно применяются в лесном комплексе, так как основные объекты лесов (участки, дороги и прочее) обладают необходимыми для этого свойствами. Применение ГИС-технологий в лесном комплексе направлено главным образом на решение задач по следующим направлениям: стратегическое планирование управления лесами, учет и оценка лесных ресурсов, мониторинг состояния лесного фонда.

Например, с точки зрения лесозаготовительной деятельности использование ГИС-технологий может повысить эффективность планирования не только традиционных методов с использованием нижних складов, но и позволит осуществить поиск эффектив-

ных методов логистики лесоматериалов и увеличение объемов лесозаготовок с использованием, например, сортиментной технологии. Данная технология усложняет задачу нахождения оптимального транспортного плана в связи с отсутствием нижних складов и увеличения номенклатуры производимой на делянке продукции. Применение ГИС-технологий для оптимизации лесозаготовительных планов и логистики заготовленной древесины повысит эффективность работ по вывозке продукции лесозаготовок [14].

В сфере мониторинга лесных ресурсов ГИС-технологии также могут выполнять ключевую роль, например, для осуществления лесопожарного мониторинга или исследования лесных пожаров с точки зрения их предупреждения, возникновения и ликвидации, а также при моделировании поведения лесных пожаров и оценке пожароопасности лесов [17]. Использование ГИС-технологий при моделировании лесных пожаров может помочь в разрешении следующих вопросов: выявление методов управления лесами, уменьшающими потери от лесных пожаров; определение социальных и экологических факторов, влияющих на возникновение лесных пожаров; анализ текущего управления лесами для повышения устойчивости и предупреждения лесных пожаров [30].

Для мониторинга состояния лесов и наполнения соответствующих баз данных объективной информацией применяются средства ДЗЗ, полученные из этих систем спутниковые данные (фотоснимки высокого разрешения) анализируются различными методами дешифрования и могут быть в дальнейшем использованы для решения задач лесоустройства [6] и лесной инвентаризации [7], мониторинга процессов лесовосстановления [3], тематического картирования и мониторинга лесного покрова с выделением лесных страт по возрасту, составу, высоте, полноте и сомкнутости полога лесных насаждений [2], а также оценки других таксационных показателей состояния

древостоев, биологической продуктивности и выявления нарушений природного и антропогенного характера в различных регионах мира [16].

При проектировании и разработке веб-ориентированной геоинформационной системы регионального лесного комплекса можно выделить следующие этапы:

- формирование программной среды для интеграции разнородных информационных источников с пространственной привязкой данных;
- разработка механизмов информационного взаимодействия различных веб-сервисов и приложений;
- организация централизованной базы пространственных данных;
- разработка интерфейсов и сервисов для визуализации и анализа накопленной информации.

Общая архитектура построения веб-ГИС регионального лесного комплекса представлена на *рисунке*.

В данной архитектуре веб-ГИС можно выделить четыре основных уровня:

- пользовательский уровень – интерфейс системы, реализованный для работы через интернет с помощью браузера (для эффективной работы интерфейса используются технологии: JavaScript, AJAX, а также различные JS-фреймворки и библиотеки);
- уровень бизнес-логики системы – данный уровень представляет логику работы и основной функционал системы, реализован на основе веб-сервера с использованием практически любых современных языков программирования с поддержкой объектно-ориентированной парадигмы, таких как PHP, Python или промышленных языков программирования Java, C++, C#, а также возможно использование различных вспомогательных фреймворков (Yii и пр.) для повышения эффективности разработки систем;
- уровень данных – данные используемые системой, в том числе и пространственные, реализован с помощью системы управ-

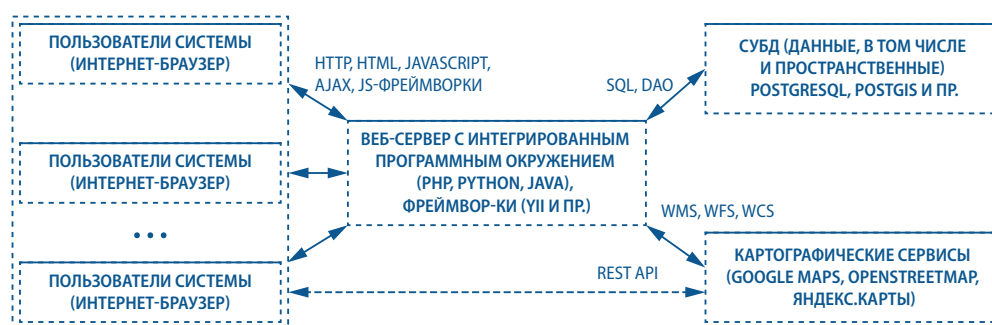


Рис. Общая архитектура веб-ГИС лесного комплекса

ления базами данных (СУБД), могут быть использованы: MySQL, PostgreSQL, Oracle, а для поддержки различных типов пространственных данных – модуль PostGIS, Oracle Spatial, ArcSDE и пр.;

– уровень открытых географических сервисов – представляет собой интерфейс доступа (API) к функционалу картографических веб-сервисов, таких как GoogleMaps, Яндекс.Карты, OpenStreetMap, что позволяет получить доступ к географическим координатам различных объектов и обеспечить интерфейс пользователя соответствующим картографическим элементом.

Представленная архитектура веб-ГИС может быть применена для реализации агент-ориентированного подхода при моделировании регионального лесного комплекса, что позволит использовать пространственные данные непосредственно в моделях поведения агентов, а это, в свою очередь, значительно расширит возможности моделирования.

Интеграция ГИС и АОМ

В настоящее время для моделирования сложных социально-экономических и технических систем применяются методы агент-ориентированного моделирования (АОМ). Данное направление имитационного моделирования активно развивается и набирает популярность среди зарубежных и российских исследователей, так как позволяет строить достаточно адекватные модели исследуемых систем [9].

Агент-ориентированное моделирование (АОМ) основано на формировании групп агентов, взаимодействующих друг с другом и с внешней средой, имеющих индивидуальное поведение, обладающее свойствами автономности, неоднородности, ограниченной интеллектуальности и расположением в пространстве [11]. Понятия «агент» и «среда» являются важнейшими классами агент-ориентированного моделирования. Эффективность агент-ориентированного моделирования достигается за счет возможности изменения различных параметров модели (свойства агентов, среды и различных взаимодействий между ними типа «агент-агент» и «агент-среда»), проведения достаточно большого количества симуляций (запусков) модели с последующей статистической обработкой результатов эксперимента [10]. Это позволяет воспроизводить с использованием АОМ различные сценарии работы социально-экономических или технических систем и при этом иметь возможность оценки реакции системы на возможные управленческие воздействия [18].

Одним из перспективных векторов развития АОМ выступает разработка АОМ с применением геоинформационных технологий (ГИС-технологий). Использование современных ГИС-технологий для реализации среды функционирования агентов может обеспечить взаимосвязь физического пространства и пространства модели (виртуального), что позволит максимально приблизить агент-ориентированные модели к реальному миру [1].

В аспекте АОМ ГИС-технологии формально представляют собой механизмы для представления разнородной информации графического и атрибутивного характера, а также методы пространственного анализа и отображения его результатов в графической форме [19].

Построение агент-ориентированной модели с использованием ГИС-технологий можно разбить на три этапа [9]:

- построение среды модели для функционирования агентов (карты, дорожная сетка, схемы движения и пр.);
- разработка свойств и методов объектов модели (агенты, элементы среды), которые имеют координаты в рамках используемой модели среды;
- инициализация объектов модели происходит перед ее запуском из базы данных ГИС для каждого экземпляра объекта (количество таких объектов, в том числе и агентов, определено параметрами модели).

АО-модели, построенные с использованием ГИС, обладают не только хорошей наглядностью (оперативно отображают исследуемое пространство с использованием картографической информации, меняющейся в режиме реального времени), но и способны более точно определить пространственные особенности моделируемого процесса или системы [13].

Так, пространственное расположение агентов определяют транспортные издержки (как финансовые, так и временные), рельеф и климат местности, административную принадлежность, возможность использования современных средств связи и прочее [15].

При этом пространственные данные должны не только быть интегрированы в среду модели, но и вступать во взаимодействие с агентами (взаимосвязь «агент-среда»). Алгоритмы функционирования самих агентов должны иметь пространственную привязку в рамках той модели среды, в которой они существуют. Как правило, пространственные элементы внешней среды

обладают свойствами статичности и экзогенности, но при этом они должны принимать активное участие во взаимодействии с агентами. На первый взгляд, в силу естественности представления внешней среды модели пространственными данными интеграция методов АОМ и ГИС может показаться достаточно простой задачей. Но на самом деле практическая реализация данных методов существенно усложняет моделирование как самой среды, так и поведения агентов.

Агентов с точки зрения взаимодействия в пространстве можно разделить на две группы [29]:

- агенты «пространственно явные» – это агенты, имеющие пространственную привязку, так сказать пространственную осведомленность, при этом они могут быть как мобильными, так и статичными;
- агенты «пространственно неявные» – это агенты, которые не используют пространственных данных при взаимодействиях с внешней средой или другими агентами, то есть они действуют без учета пространственного положения.

Можно выделить следующие основные факторы, усложняющие интеграцию АОМ и ГИС-технологий:

- разработка моделей поведения «пространственно явных» агентов: модели принятия решений агентами в пространстве должны выполнять достаточно сложные с алгоритмической точки зрения задачи, такие как логистические задачи (поиск оптимального пути и прочие), задачи выбора оптимального плана деятельности, производства и прочие;
- калибровка моделей с использованием пространственных данных при краткосрочном периоде симуляции может быть невозможна, так как периоды обновления пространственных данных составляют несколько лет, а период симуляции построенной модели может составлять менее года, в этом случае не будут учтены пространственные изменения в этот период;

– доступность пространственных данных. В настоящее время имеются общедоступные картографические сервисы (GoogleMaps, OpenStreetMap, Яндекс.Карты), которые обладают следующими данными: космические снимки Земли, сеть автомобильных и железнодорожных дорог, координаты населенных пунктов. Однако информация о специализированных производственных объектах, ресурсных базах присутствует только в закрытых специализированных производственных или ведомственных ГИС-системах, и доступ к данной информации ограничен;

– значительная ресурсоемкость АОМ-ГИС-систем: на это влияет, с одной стороны, высокая алгоритмическая сложность интеллектуальных «пространственно-явных» агентов, с другой стороны, большие объемы пространственных данных, которые можно отнести к категории «BIG DATA», при моделировании на уровне страны или планеты.

На текущий момент разработано большое количество АОМ-ГИС-моделей, например:

– воспроизводство научного потенциала России на базе геоинформационной системы [29];

– модель креативного города [27];

– модель оказания гуманитарной помощи [26];

– модель управления лесами для снижения потерь от лесных пожаров [30];

– модель диффузии технологий внутреннего водопользования в интегрированной АОМ-ГИС-модели [28];

– модель изменения городского землепользования [25];

– модель интегрированной системы динамического ландшафтного анализа и моделирования [25].

При анализе данных систем можно выделить два уровня интеграции АОМ-ГИС-моделей. Первый уровень – это поверхностная интеграция, в данном случае пространственные данные используются только для отображения деятельности аген-

тов или результатов симуляции модели. На данном уровне находится большинство представленных моделей. Второй уровень – это глубокая интеграция. В этом случае агенты способны выполнять различные пространственные задачи; активно используются точные географические координаты и программные интерфейсы ГИС-систем. Данным уровнем интеграции в полной мере не обладает ни одна из представленных систем. К такому уровню интеграции приближаются модели городского автомобильного движения (автомобильный трафик, развязки, системы управления дорожным движением), но данные системы скорее можно отнести к системам микроуровня, и при увеличении масштаба модели до уровня региона или страны задача симуляции становится невыполнимой.

С точки зрения инструментальных средств разработки АОМ-ГИС-моделей выделяют АОМ-центричные системы и ГИС-центричные системы, первые основаны на программных системах агент-ориентированного моделирования с добавлением функций ГИС, вторые, напротив, являются ГИС-системами с реализацией функций агентного моделирования [10]. Исследователь, как правило, пользуется тем инструментарием, который может быть применим для реализации необходимых им моделей, а также немаловажную роль играет наличие документации, примеров моделей и сообщества разработчиков, пользующихся конкретным инструментарием (специализированные форумы или другие коммуникационные площадки), доступность инструментария и возможность его масштабирования также играют немаловажную роль. В статье [4] представлен анализ функционала различных инструментальных средств АОМ по нескольким критериям, что может быть использовано при выборе такого рода системы.

Инструментальные средства разработки могут помочь исследователям в достаточно короткий срок запустить прототип модели.

Но при увеличении масштабов моделей до макроуровня и обработке массивов данных категории «BIG DATA» данные средства разработки окажутся маловостребованными, так как для запуска моделей такого уровня необходимо использовать суперкомпьютеры, где имеются собственные средства разработки для параллельных вычислений, не связанные с системами АОМ или ГИС. Поэтому для разработки рабочих моделей такого уровня используются средства программной разработки (языки программирования Java, C++, C# и пр.). Также системы программной разработки используются, если необходимо реализовать функционал моделей, который отсутствует в инструментальных средствах АОМ или ГИС, но это потребует от разработчика модели знаний в области программной инженерии, языков программирования и различных программных интерфейсов (API).

Выводы

ГИС-технологии стремительно развиваются, возможности средств дистанционного зондирования Земли увеличиваются, объем и качество пространственных данных растут, количество программных систем, использующих ГИС-данные, увеличивается, появились доступные веб-ГИС-системы, развиваются открытые программные интерфейсы для доступа к пространственным данным. ГИС-технологии активно используются в лесном комплексе при оценке лесных ресурсов, для предотвращения лесных пожаров, в лесовосстановлении, управлении лесным комплексом.

Методы и инструментарий имитационного моделирования (в частности АОМ) также находятся на пике развития. Разработаны более двух десятков систем АО-моделей, с их помощью выполнены несколько сотен моделей, в различных сферах деятельности (биология, социология, экономика и пр.) и различного масштаба (от микроуровня до макроуровня).

В силу активного развития методов АОМ и ГИС возникает потребность их интеграции в единые модели для решения задач моделирования, максимально приближенных к реальному миру. Разработанные на текущий момент АОМ-ГИС-модели интегрированы недостаточно глубоко, только на уровне представления результатов исследований или деятельности агентов. Для осуществления более глубокой интеграции необходимо решить следующие задачи: разработка моделей поведения «пространственно явных» агентов; разработка методов калибровки моделей с использованием пространственных данных; обеспечение доступности пространственных данных; повышение производительности вычислительных средств или повышение доступности суперкомпьютерных систем для проведения симуляций моделей макроуровня. Разработка интегрированной АОМ-ГИС-модели для управления региональным лесным комплексом является актуальной задачей, требующей преодоления вышеуказанных факторов, а решение данной задачи позволит вывести процессы управления лесным комплексом региона на качественно иной уровень.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахтизин, А. Р. Агент-ориентированные модели экономики [Текст] / А. Р. Бахтизин. – М. : Экономика, 2008. – 279 с.
2. Воробьев, О. Н. Дистанционный мониторинг городских лесов [Текст] / О. Н. Воробьев, Э. А. Курбанов, А. В. Губаев, Ю. А. Полевщикова, Е. Н. Демишева, В. О. Коптелов // Вестн. Поволжского гос. технологического ун-та. Сер. «Лес. Экология. Природопользование». – 2015. – № 1 (25). – С. 5–21.

3. Воробьев, О. Н. Методика пошаговой классификации спутниковых снимков для тематического картирования лесов [Текст] / О. Н. Воробьев, Э. А. Курбанов, А. В. Губаев, Е. Н. Демишева // Вестн. Поволжского гос. технологического ун-та. Сер. «Лес. Экология. Природопользование». – 2015. – № 4 (28). – С. 57–69.
4. Гулин, К. А. Российский и зарубежный опыт интеграции агент-ориентированных моделей и геоинформационных систем [Текст] / К. А. Гулин, А. И. Россошанский // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2016. – № 5. – С. 141–157.
5. Кадочников, А. А. Формирование геоинформационного интернет-портала для задач мониторинга состояния природной среды и ресурсов [Текст] / А. А. Кадочников, В. Г. Попов, А. А. Токарев, О. Э. Якубайлик // Журн. Сибирского федерального ун-та. Сер. «Техника и технологии». – 2008. – № 4. – Т. 1. – С. 375–384.
6. Курбанов, Э. А. Тематическое картирование и стратификация лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам Landsat [Текст] / Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, С. А. Незамаев, А. В. Губаев, С. А. Лежнин, Ю. А. Полевщикова // Вестн. Поволжского гос. технологического ун-та. Сер. «Лес. Экология. Природопользование». – 2013. – № 3 (19). – С. 82–92.
7. Курбанов, Э. А. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat [Текст] / Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, А. В. Губаев, С. А. Лежнин, Ю. А. Полевщикова, Е. Н. Демишева // Вестн. Поволжского гос. технологического ун-та. Сер. «Лес. Экология. Природопользование». – 2014. – № 1 (21). – С. 18–32.
8. Мазуров, Б. Т. Совершенствование информационной базы региональных ГИС (РГИС) для инвентаризации и картографирования природных ресурсов [Текст] / Б. Т. Мазуров, О. Н. Николаева, Л. А. Ромашова // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2012. – № 2 (доп.). – С. 198–203.
9. Макаров, В. Л. Новый инструментарий в общественных науках агент-ориентированные модели: общее описание и конкретные примеры [Текст] / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин // Экономика и управление. – 2009. – № 12 (50). – С. 13–25.
10. Макаров, В. Л. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели) [Текст] / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин. – М. : Экономика, 2013. – 296 с.
11. Макаров, В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д. Агент-ориентированные модели как инструмент апробации управленческих решений [Текст] / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Е. Д. Сушко // Управленческое консультирование. – 2016. – № 12 (96). – С. 16–25.
12. Макаров, В. Л. Оценка эффективности регионов РФ с учетом интеллектуального капитала, характеристик готовности к инновациям, уровня благосостояния и качества жизни населения [Текст] / В. Л. Макаров, С. А. Айвазян, М. Ю. Афанасьев, А. Р. Бахтизин, А. М. Нанавян // Экономика региона. – 2014. – № 4. – С. 9–30.
13. Маковеев, В. Н. Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий [Текст] / В. Н. Маковеев // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2016. – № 5. – С. 272–289.
14. Соколов, А. П. Оптимизация логистики лесозаготовок [Текст] / А. П. Соколов, В. С. Сюнев, Ю. Ю. Герасимов, Т. Карьялайнен // Resources and Technology. – 2012. – Т. 9. – № 2. – С. 117–128.
15. Суслов, В. И. Опыт агент-ориентированного моделирования пространственных процессов в большой экономике [Текст] / В. И. Суслов, Д. А. Доможиров, В. С. Костин, Л. В. Мельникова, Н. М. Ибрагимов, А. А. Цыплаков // Регион: экономика и социология. – 2014. – № 4. – С. 32–54.
16. Фалейчик, Л. М. Опыт применения ГИС-технологий для оценки масштабов воздействия горнопромышленного комплекса на природные системы Юго-Востока Забайкалья [Текст] / Л. М. Фалейчик, О. К. Кирилюк, Н. В. Помазкова // Вестн. Забайкальского гос. ун-та. – 2013. – № 6 (97). – С. 64–79.
17. Ходаков, В. Е. Лесные пожары: методы исследования [Текст] / В. Е. Ходаков, М. В. Жарикова. – Херсон : Гринь Д. С., 2011. – 470 с.
18. Чекмарева, Е. А. Новое в методологии исследования социального пространства, или Что такое агент-ориентированное моделирование? [Электронный ресурс] / Е. А. Чекмарева // Социальное пространство. – 2016. – № 4. – Режим доступа : <http://sa.vscs.ac.ru/article/2016>
19. Чекмарева, Е. А. Обзор российского и зарубежного опыта агент-ориентированного моделирования сложных социально-экономических систем мезоуровня [Текст] / Е. А. Чекмарева // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2016. – № 2. – С. 225–246.
20. Шокин, Ю. И. Распределенная информационно-аналитическая система для поиска, обработки и анализа пространственных данных [Текст] / Ю. И. Шокин, О. Л. Жижимов, И. А. Пестунов, В. В. Смирнов, Ю. Н. Синявский // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12. – № 3. – С. 108–115.

21. Шокин, Ю. И. Распределенная информационная система сбора, хранения и обработки спутниковых данных для мониторинга территорий Сибири и Дальнего Востока [Текст] / Ю. И. Шокин, И. А. Пестунов, В. В. Смирнов и др. // *Техника и технологии*. – 2008. – Т. 1. – Вып. 4. – С. 291–314.
22. Якубайлик, О. Э. Модель геоинформационной аналитической интернет-системы для анализа состояния и презентации региона [Текст] / О. Э. Якубайлик, А. А. Кадочников, В. Г. Попов, А. В. Токарев // *Вестн. Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева*. – 2009. – Вып. 4 (25). – С. 61–66.
23. Якубайлик, О. Э. Геоинформационная интернет-система мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли [Текст] / О. Э. Якубайлик // *Вестн. Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева*. – 2010. – № 1. – С. 40–45.
24. Якубайлик, О. Э. Технологии для геоинформационных интернет-систем [Текст] / О. Э. Якубайлик, В. Г. Попов // *Вычислительные технологии*. – 2009. – Т. 14. – № 6. – С. 116–126.
25. Brown D.G., Riolo R., Robinson D.T., North M., Rand W. Spatial process and data model toward integration agent-based models and GIS. *Journal of Geographical Systems*, 2005, no. 7, pp. 5–47.
26. Crooks A.T., Wise S. GIS and Agent-Based models for Humanitarian Assistance. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2013, no. 41, pp. 100–111.
27. Malic A., Crooks A., Root H., Swartz M. Exploring Creativity and Urban Development with Agent-Based Modeling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2015, 18 (2). URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/18/2/12.html>
28. Galán J.M., del Olmo R., López-Paredes A. Diffusion of domestic water conservation technologies in an ABM-GIS integrated model. *Hybrid Artificial Intelligent Systems (HAIS)*, Berlin: Springer, 2008, pp. 567–574.
29. Heppenstall A., Crooks A.T., See L.M., Batty M. (Eds.). *Agent-based Models of Geographical Systems*. N. Y.: Springer, 2012. 746 p.
30. Charnley S. Diversity in forest management to reduce wildfire losses: implications for resilienc. *Ecology and Society*, 2017, vol. 22.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гулин Константин Анатольевич – доктор экономических наук, доцент, заместитель директора, заведующий отделом проблем научно-технологического развития и экономики знаний. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Вологодский научный центр Российской академии наук». Россия, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а. E-mail: gil@vscc.ac.ru. Тел.: +7(8172) 59-78-22.

Ригин Василий Александрович – старший научный сотрудник, заведующий сектором технического обеспечения и информационной безопасности. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Вологодский научный центр Российской академии наук». Россия, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а. E-mail: var@vscc.ac.ru. Тел.: +7(8172) 59-78-44.

Gulin K.A., Rigin V.A.

ISSUES OF APPLICATION OF GEO-INFORMATION TECHNOLOGIES IN AGENT-BASED MODELING OF THE REGIONAL FOREST COMPLEX

The article gives an overview of the development of geo-information technologies and methods of agent-based modeling and considers the possibilities of integration of these technologies in the construction of simulation models by Russian and foreign researchers. The article presents an overview of the capabilities of modern geo-information technologies, the current status of methods of remote sensing and thematic mapping as the foundation for modern geographic information systems. We consider in more detail the basic stages of development of distributed geographic information systems, their main advantages compared to desktop systems and make a review of basic tools for processing and analyzing spatial data. We define the main advantages of web geographic information systems as a result of the integration of web technology and geographic information systems and their areas of use in the forest industry, we present the general architecture of web-oriented geo-information system of the regional forest complex. In the final part, we consider the integration of agent-based modeling and geographic information systems, define the main advantages of using data integration technologies, identify the main stages of building agent-based models using spatial data, analyze agent-based models using geographic information systems developed by Russian and foreign researchers. As a result, we identify the different levels of integration and key issues of using spatial data of geographic information systems in agent-based models.

Geographic information systems, agent-based modeling, integration of agent-based models and geographic information systems, regional forest complex.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gulin Konstantin Anatol'evich – Doctor of Economics, Associate Professor, Deputy Director for Science, Head of the Department of Scientific and Technological Development and Knowledge Economics. Federal State Budgetary Institution of Science “Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences”. 56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation. E-mail: gil@vscc.ac.ru. Phone: +7(8172) 59-78-22.

Rigin Vasili Aleksandrovich – Senior Research Associate, Head of the Sector for Technical Support and Information Security. Federal State Budgetary Institution of Science “Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences”. 56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation. E-mail: var@vscc.ac.ru. Phone: +7(8172) 59-78-44.