

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ: ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Л.Г. Ханина¹, В.Э. Смирнов¹, Н.В. Лукина²

¹ Институт математических проблем биологии РАН
142290 Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, 4, e-mail: lkhanina@rambler.ru

² Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
117810, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.84/32

Проведен обзор современных компьютерных систем поддержки принятия решений (СПР), предназначенных для использования в управлении лесным хозяйством. Даны основные понятия, приведены примеры. Рассмотрены существующие подходы к реализации основных блоков СПР – информационного, модельного, оптимизационного и визуализационного. Обзор современных систем проведен преимущественно по материалам зарубежной печати и с использованием Интернет-источников. В обзор также включены отечественные модельные разработки. Рассмотрены особенности современного этапа развития СПР, выражающиеся в интеграции баз данных и баз знаний, в разработке пространственных и гибридных СПР, в развитии техники решения многокритериальных задач. Показано, что проблемы устойчивого управления многофункциональным лесным хозяйством в условиях глобальных изменений могут успешно решаться только с применением СПР, позволяющих учитывать взаимовлияние множества факторов и интересов. Сделано предположение, что наиболее эффективным путем создания СПР для помощи в организации устойчивого лесного хозяйства России является объединение уже существующих лесных моделей на единой программной и технической базе – создание российской платформы лесных моделей с общим пользовательским интерфейсом и современными визуализационными возможностями.

Ключевые слова: устойчивое управление лесами, системы поддержки принятия решений, моделирование лесных экосистем, оптимизация принятия решений, ГИС-технологии, ИТ-технологии

Decision Support Systems developed for forest management is reviewed. The main terms are defined and some examples are presented. International scientific publications and Internet resources are used for the review. Russian forest modelling systems are also included into the review. The inference is as follows: it is necessary to develop and to apply Decision Support Systems for Sustainable Forest Management in Russia; and it is possible to realize due to the developed earlier Russian forest modelling systems.

Keywords: sustainable forest management, decision support systems, forest ecosystem modeling, decision optimization procedure, GIS-technology, IT-technology

ВВЕДЕНИЕ

Проведен обзор современных компьютерных систем поддержки принятия решений, предназначенных для использования в управлении лесным хозяйством. Даны основные понятия, приведены примеры. Обзор современных систем проведен преимущественно по материалам зарубежной печати и с использованием Интернет-источников. В обзор включены также системы, разработанные в России. Сделан вывод о необходимости и возможности разработки и использования компьютерных систем поддержки принятия решений для организации устойчивого управления лесами России.

Устойчивое управление лесами, системы поддержки принятия решений, моделирование лесных экосистем, оптимизация принятия решений, ГИС-технологии, ИТ-технологии. Ключевой принцип современной лесной политики – устойчивое развитие многофункционального лесного хозяйства. Лесной сектор направлен на многоцелевое использование лесов с учетом их глобального экологического значения, сохранения биоразнообразия и экосистемных функций.

Россия, наряду с другими лесными странами, уча-

ствует в так называемых Монреальском и Хельсинском процессах, в ходе которых были выработаны и приняты на государственных уровнях критерии и индикаторы устойчивого управления лесами (Критерии и индикаторы..., 1998). Эти критерии следующие: 1) сохранение биологического разнообразия на экосистемном, видовом и генетическом уровнях; 2) поддержание продукционной способности лесных экосистем; 3) поддержание жизнеспособности лесных экосистем в условиях негативных антропогенных и природных воздействий; 4) сохранение почвозащитных, водорегулирующих и других защитных функций леса; 5) поддержание вклада лесов в глобальный экологический цикл; 6) поддержание и расширение социально-экономических выгод для удовлетворения общественных нужд.

Соответственно международным требованиям и соглашениям, современное лесное хозяйство должно быть не только экономически прибыльным, неистощительным (т.е. обеспечивать лесной продукцией – древесной и недревесной – нынешнее и последующие поколения), но также оно должно заботиться о выполнении лесом присущих ему экосистемных и биосферных функций. Устойчивое управление лесами должно учитывать локальные и региональные экологические и социально-экономические условия, должно уметь адаптироваться к изменениям климата, учитывать возможные катастрофические воздействия на

* Статья частично поддержана проектом «Forest management design support system, COST Action FP0804»

лес – пожары, ураганы, наводнения, засухи. Тем самым, при управлении лесами на всех уровнях (федеральном, региональном, локальном) как при долгосрочном, так и краткосрочном планировании необходимо решать многокритериальные задачи – задачи сочетания интересов различных групп пользователей, задачи поиска компромиссов и выстраивания гибкой стратегии и тактики управления.

Идентификация и оценка последствий различных стратегий управления, направленных на устойчивое лесопользование, невозможны без применения современных информационных технологий, в частности без разработки компьютерных систем поддержки принятия решений (СПР, или DSS – decision support systems). Такие системы позволяют: (1) учитывать функции, которые потенциально способны выполнять лесные экосистемы на конкретных территориях; (2) оценивать современное состояние лесных экосистем и функции, которые они выполняют в настоящее время; (3) оценивать влияние современного управления лесами на такие «экосистемные услуги», как формирование и защита почв, формирование качества и количества воды, формирование циклов элементов питания, создание местообитаний для растений и животных; (4) оценивать выбор той или иной стратегии лесопользования с учетом ожиданий собственника лесов; (5) предлагать альтернативные пути лесопользования. СПР состоят из нескольких блоков, основными из которых являются базы данных, базы знаний, экологическая и экономическая оценка экосистемных функций, моделирование сценариев. Экономические оценки экосистемных функций базируются на эффективности и рентабельности, а экологические оценки основываются на способности экосистем к самоподдержанию. За рубежом, особенно в европейских странах и Северной Америке, СПР активно развиваются и находят все более широкое применение на различных уровнях ведения лесного хозяйства. Вместе с тем, недавний обширный анализ Северо-Американских СПР для задач сохранения лесного биоразнообразия (Gordon S.N., 2007) показал, что СПР могут как существенно помочь в принятии правильного решения, так и существенно затруднить его принятие. Последнее возможно, например, в случае, когда применение СПР приводит к медленному и дорогостоящему процессу принятия решений, или ошибочно фокусирует внимание пользователя на несущественных проблемах и задачах, или создает иллюзию определенности, или наоборот – вселяет чувство неуверенности и беспомощности среди пользователей системы. Таким образом, опыт использования СПР за рубежом, в том числе в практике лесного управления, достаточно большой и разнообразный, и учет его для организации эффективного управления на разных уровнях в России был бы крайне желателен. Обзор современных СПР в управлении лесами, их анализ с точки зрения возможности и желательности применения подобных систем в России является целью нашей работы.

Основные понятия. Компьютерной системой поддержки принятия решений называют интерактивный и гибкий набор компьютерных средств, который интегрирует интуицию и знания специалиста, принимающего решение, с возможностями информацион-

ной обработки и моделирования с целью улучшения качества принимаемого решения (Varma V.K., 2000). СПР предназначены для того, чтобы организовать процесс выработки решений и обеспечить при необходимости гибкий доступ к полному набору директивных и описательных документов, прогностических и визуализационных средств, относящихся к решению конкретной задачи. СПР должна помогать пользователю на всех этапах процесса принятия решений. Эти этапы следующие: определение проблемы, планирование различных сценариев ее решения, выбор (с оценкой альтернатив), выполнение решения и мониторинг ситуации. Соответственно этапам, основными структурными частями (подсистемам) СПР являются: 1) информационный блок, содержащий базы данных и базы знаний об объекте управления, внешних воздействиях, стратегиях и правилах ведения хозяйства; 2) модельный блок, реализующий (проигрывающий) различные сценарии ведения хозяйства; 3) оптимизационный блок, предназначенный для решения многокритериальных оптимизационных задач и 4) блок визуализации и дружественного интерфейса человека с компьютерной системой.

Первые СПР возникли еще в начале 70-х годов XX века вместе с увеличением мощности и быстродействия компьютеров. К настоящему времени технология создания СПР достаточно хорошо разработана, они активно используются во многих областях деятельности человека. Последний обширный обзор-руководство по разработке СПР (Burstein F, 2008) содержит всесторонний анализ наиболее важных методологических подходов к разработке СПР и примеры их использования в странах Северной Америки, Европы и Азии. Из обзора следует, что где бы не применялись СПР - от уровня индивидуального использования до уровня государственных политических решений, - везде простота и легкость использования системы являются наиболее существенным фактором ее реального применения. Легкость использования означает комбинацию (а) четкости целей системы, (б) понятного интерфейса и (в) реальной поддержки процесса принятия решения посредством используемых в системе моделей и методов. Все эти три фактора являются решающими в успехе применения СПР.

В лесном хозяйстве первые СПР были разработаны для решения задач планирования лесозаготовок (Forest Management Planning), т.е. для оптимизации динамики получения прибыли от продажи древесной продукции с лесного участка в течение заданного периода времени. В первых таких системах экологические критерии в управлении лесами в расчет не принимались. Возможные сценарии ведения лесного хозяйства зависели от (а) породного состава и возраста древостоя, (б) существующих инструкций и правил лесопользования, и (в) определялись с учетом интересов пользователя – собственника леса. К таким системам планирования лесного хозяйства относятся, в частности, MELA в Финляндии (Siitonen M., 2001), MONTE в Испании (Pukkala T., 2003). Рассмотрим принципы реализации СПР на примере системы MONTE.

СПР для планирования лесного хозяйства MONTE. Цель лесного планирования - выявление

оптимального пути использования лесных ресурсов для максимизации прибыли. MONTE содержит подсистемы: 1) управления данными, 2) моделирования роста древостоя по выделам, 3) оптимизации, 4) визуализации выделов и лесного ландшафта. MONTE полностью адаптирована для лесов Каталонии (Испания).

Подсистема управления данными. Система использует данные лесной таксации (инвентаризации лесов), которые могут быть переданы в MONTE из другой системы (например, Excel или Access). Предполагается, что лес разделен на выделы (forest compartments или stands), либо на более крупные блоки, которые подразделяются на выделы. Выделы однородны по типам условий местопроизрастания и бонитету, видовому составу, возрасту и полноте древостоя. Выдел – единица планирования, которая не может быть разделена на более мелкие части. Для составления лесохозяйственного плана используется многоцелевой количественный подход. Первый шаг – симуляция (моделирование) альтернативных режимов (порядка лесохозяйственных операций) для каждого выдела. Второй шаг – оптимизация, комбинирующая результаты отдельных симуляций с целями управления лесом.

Подсистема моделирования. Моделирование различных режимов (альтернатив) ведения хозяйства для каждого выдела базируется на инструкциях по ведению хозяйства и на моделях индивидуального роста и выживания деревьев. Пользователь по желанию может включить в расчеты только часть анализируемой территории. Планирование может быть разделено на 1-3 подпериода, каждый из которых длится от двух до двадцати лет. После того, как параметры моделирования заданы, MONTE для каждого выдела автоматически составляет «лесохозяйственный план» - рассчитывает порядок проведения лесохозяйственных операций в соответствии с инструкциями, которые также могут быть скорректированы пользователем. Так, например, если древостой одновозрастный, то рассчитываются рубки прореживания для поддержания определенной полноты древостоя, а также рубки главного пользования, зависящие от возраста древостоя. Если древостой разновозрастный, то назначаются выборочные рубки в зависимости от общей площади поперечного сечения древостоя, а также назначаются операции прореживания для деревьев различных размерных классов. Момент времени проведения операций может быть различным. Пользователь может управлять как временем, так и последовательностью проведения операций. В результате работы данного блока для каждого выдела моделируются различные комбинации рубок и посадок деревьев, и для всей территории получается достаточно большое число различных «продукционных схем».

Подсистема оптимизации. В процессе оптимизации создается «плановая модель», которая решается с использованием оптимизационных количественных методов (Pukkala T., 2002). Моделирование альтернативных режимов создает «пространство решений», из которого в процессе оптимизации выбирается лучшая комбинация лесохозяйственных воздействий для каждого выдела. Оптимизация начинается с выбора поль-

зователем целевых переменных из списка. Изначально MONTE предполагает, что все цели одинаково важны. Позже, в интерактивном режиме, пользователь может назначить различные веса различным целям. Функция «суб-полезности» рассчитывается для каждой цели на основе определения минимальных, заданных и максимальных значений целевых переменных и их приоритетов. На основе весов и функций суб-полезности рассчитывается функция полезности, которая максимизируется с помощью различных эвристических алгоритмов. Задача этих алгоритмов – найти такую комбинацию последовательности лесохозяйственных операций на выделах, при которой функция полезности была бы максимальной. Возможно назначение следующих целевых переменных: а) общий запас на выделе, б) запас древесины, в) запас «живой» древесины, г) прирост древостоя, д) площадь возобновления.

Подсистема визуализации. В MONTE возможна трехмерная визуализация каждого выдела в «планируемом» лесу. После составления плана возможен пошаговый просмотр будущего состояния выделов, с которыми будут произведены выбранные действия. Также в системе возможна трехмерная визуализация всего лесного участка на ландшафтном уровне. Ландшафт можно рассматривать с различных точек в пространстве. Возможен просмотр ландшафта для разных моментов времени при реализации тех или иных альтернативных планов лесопользования.

Таким образом, система MONTE представляет собой СПР для планирования ведения хозяйства в одновидовых лесных насаждениях без учета пространственной структуры древостоев и без оценки динамики (или состояния) каких-либо экологических параметров. При этом в MONTE присутствуют все компоненты СПР – управление данными, моделирование, оптимизация и визуализация; и задача оптимизации «продукционной программы» решается с помощью набора нетривиальных эвристических алгоритмов. В настоящее время существуют различные подходы к реализации структурных блоков СПР, рассмотрим некоторые из них.

Существующие подходы к реализации подсистем СПР. Задачи оптимизации обычно решаются с помощью методов линейного программирования. Компьютерные системы для лесного планирования, основанные на линейном программировании, были разработаны во многих странах, например, модель FORPLAN в США (Johnson K.N., 1986), модель MELA в Финляндии (Siitonen M., 2001) и GAYA-JLP в Норвегии (Hoen H.F., 1996). Однако, во многих случаях реальные проблемы более сложны, чем те, которые могут быть решены алгоритмами линейного программирования. В таких случаях либо проблема упрощается так, чтобы ее можно было решить точными методами, либо решение ищется с использованием эвристических алгоритмов (например, (Davis L-S., 2001; Pukkala T., 2002)). Эвристические алгоритмы способны найти хорошее решение при довольно простых вычислениях, однако они не гарантируют, что найденное решение строго оптимально. Достоинство этих алгоритмов состоит в том, что реальные проблемы процесса принятия решения могут быть лучше формализованы с их

помощью, чем с помощью точных методов. В случае, когда требуется найти решение среди множества альтернатив, преследующих разные цели (например, получение дохода с вырубки леса и сохранение местобитаний редких видов), используют многокритериальные модели решений (MCDM – MultiCriteria Decision Models). За последние 25 лет различные техники решения многокритериальных задач были разработаны, однако, по мнению аналитиков (Gordon S.N., 2007; Mendoza G.A., 2006), наиболее популярной среди них остается метод анализа иерархий (АНР - analytic hierarchy process), разработанный Т. Саати (Саати Т., 1993). Модели решений, использующие АНР, относительно легко строить, они базируются на строго обоснованной теории и хорошо разработанной технологии, их результаты легко объяснить, что делает их эффективным средством взаимодействия с пользователем СПР. В настоящее время наиболее широко используются две MCDM-системы, основанные на методе анализа иерархий: Criterium DecisionPlus (<http://www.infoharvest.com>) и ExpertChoice (<http://www.expertchoice.com>).

Аналогично различным подходам к решению задачи оптимизации, существуют различные подходы к решению задачи моделирования лесных экосистем. В недавно опубликованном обширном обзоре моделей (Pretzsch H., 2008) были выделены три основных класса моделей, предназначенных для использования в управлении лесным хозяйством: (1) симуляторы роста и продуктивности древостоев, (2) балансовые модели и (3) ландшафтные модели. Модели первого класса были условно поделены на (а) модели, прогнозирующие средние характеристики древостоя на уровне лесотаксационного выдела; (б) модели, рассматривающие развитие отдельных деревьев с учетом условий местообитания и конкуренции между соседями; и (в) гэм-модели, в которых рост дерева определяется его физиологическими параметрами и экологическими условиями среды. Балансовые модели базируются на описании биогеохимических процессов в лесных экосистемах и называются также «процессно-ориентированными моделями». Ландшафтные модели представляют собой широкий класс пространственно-привязанных моделей, в которых учитывается гетерогенность условий местообитания, взаимодействия между соседями и обратные связи между различными пространственными процессами. Ландшафтные модели сильно различаются между собой по детальности описания лесных экосистем и потоков вещества, а также по тому, какие в них учитываются взаимодействия между пространственными процессами (см. обзор (He N.S. Forest...2008)). На настоящий момент все более востребованными становятся модели, которые описывают рост и возобновление отдельных деревьев или их когорт на основе физиологических процессов, связанных с водным балансом и балансом питательных веществ конкретного местообитания (Hasenauer H., 2005; Pretzsch H., 2008). Такие модели чувствительны к изменениям среды и к нарушениям разного рода; они могут быть использованы для длительного и краткосрочного планирования при организации экологически устойчивого лесного хозяйства. В целом, существующие модели покрывают большое разнообразие продук-

ционных, экологических и ландшафтных задач в сфере управления лесами. Вероятно, более перспективный путь сегодня состоит не в разработке «универсальной модели» для лесного управления, а в создании некоторой «платформы моделей», из которых по мере необходимости выбирается та или иная модель для решения конкретной задачи пользователя (de Coligny F., 2008; Pretzsch H., 2008). Блок визуализации в лесных СПР, как правило, поддерживается с помощью ГИС (геоинформационных) технологий, поскольку данные лесной таксации (инвентаризации лесов) также поддерживаются этими технологиями. Вместе с тем, во многих системах реализована трехмерная динамическая визуализация лесных выделов и ландшафтов, в некоторых системах присутствуют элементы пространственного анализа.

Любая компьютерная система, содержащая один или несколько достаточно хорошо разработанных компонентов СПР – блок моделирования, оптимизации, визуализации или оценки – также зачастую в литературе относится к СПР. Наиболее известные такие системы - зарубежные и российские - сведены нами в таблице 1 и 2, соответственно. Источниками информации для таблицы 1, помимо научных публикаций, явились сведения о СПР, представленные в недавно завершеном проекте Национальной комиссии США по науке и устойчивому лесопользованию (Gordon S.N., 2007). Анализ таблицы показывает, что за рубежом существует достаточно большое разнообразие компьютерных систем, которые можно отнести к «лесным» СПР. Разнообразие наблюдается как в объеме и перечне решаемых задач, так и в используемых компьютерных инструментах. СПР можно ранжировать по степени увеличения сложности задач, для решения которых они предназначаются: от задач краткосрочного планирования лесозаготовок в одновидовых одновозрастных древостоях (система MONTE) до комплексного ландшафтного моделирования (пространственного и динамического) экологических и социально-экономических параметров лесных территорий (система CLAMS). По используемым компьютерным средствам также, с одной стороны, выделяются достаточно простые системы, реализующие либо отдельные блоки СПР (например, модели Moses, SIBYLA), либо все блоки СПР, но с простой их внутренней структурой (например, системы SGIS, SADfLOR). С другой стороны, выделяются системы с довольно серьезными проработками модельных либо оптимизационных блоков (например, системы ToSIA, RAMAS, TELSA). В лесном хозяйстве России компьютерные системы поддержки принятия решений практически отсутствуют. Вместе с тем, существует довольно много «лесных» моделей частично представленных в таблице 2. Они были выбраны нами из всего разнообразия разрабатываемых в России моделей и компьютерных систем исходя из «принципа наибольшей готовности» для использования в СПР в лесном хозяйстве. Области применения представленных шести моделей взаимно дополняют друг друга: это моделирование возникновения и распространения лесных пожаров (№ 1 табл. 2); моделирование динамики популяций лесных насекомых-филофагов (№ 2 табл. 2); моделирование динамики породно-возрастной структуры лесов (№ 1 табл. 2)

Таблица 1 - Характеристика наиболее известных зарубежных СПР в задачах управления лесами

N п/п	Название. Страна-изготовитель.	Общая информация*	Решаемые задачи	Входные данные	Реализованные элементы внешних воздействий	Оценка индикаторов устойчивого управления лесами
1	2	3	4	5	6	7
1	CAPSIS [11]. Франция.	М Лок. Рег. Глоб.	Платформа для моделирования динамики лесных экосистем. Содержит более 40 моделей.	Определяются конкретной моделью.	Определяются конкретной моделью.	Определяются конкретной моделью.
2	CLAMS [13]. США.	МГ Лок. Рег.	Моделирование экологических и социально-экономических аспектов ведения хозяйства в прибрежных лесных районах в условиях многих собственников на землю.	Данные лесоустройства, карты землепользования, топографические, гидрологические и др. Характеристики объектов моделирования в зависимости от задачи. Экономические и социальные параметры.	Л/х**. Различные сценарии использования водных ресурсов. Рекреация.	Индикаторы биоразнообразия, в т.ч. оценка местообитаний диких животных. Поддержание продукционной способности лесных экосистем и др.
3	DSD [27]. Австрия.	МО Лок.	СПР для планирования лесопользования в небольших лесных массивах с доминированием хвойных пород.	Данные лесоустройства. Характеристики деревьев и местообитаний. Ценовые характеристики.	Л/х.	Поддержание продукционной способности лесных экосистем.
4	EMDS [38, 39]. США.	ГОц Лок. Рег. Глоб.	Многофункциональное управление лесами на основе ГИС-технологий и методов экспертных систем.	Характеристики растительности и ландшафтов. Экономические и социальные параметры.	Пожары, загрязнение, объединение побегов копытными и др.	Различные индикаторы [38] в зависимости от приложений.
5	FVS [20]. США.	МГ Лок. Рег.	Семейство моделей для моделирования динамики многовидовых разновозрастных древостоев.	Данные лесоустройства. Характеристики деревьев и местообитаний. Экономические параметры.	Л/х. Пожары. Поражение древостоя насекомыми, болезнями.	Индикаторы биоразнообразия, в т.ч. разнообразие напочвенного покрова.
6	LMS[29]. США.	МГОц Лок. Рег.	Модели динамики древостоя, программы визуализации и анализа для управления лесными экосистемами на ландшафтном уровне.	Данные лесоустройства. Таблицы хода роста. Характеристики деревьев и местообитаний.	Л/х. Пожары.	Индикаторы биоразнообразия, в т.ч. оценка местообитаний диких животных. Динамика углерода древостоя.
7	MELA [43]. Финляндия.	МОГОц Лок. Рег. Нац.	СПР для лесного планирования и оценки продукционного потенциала лесов	Данные лесоустройства. Характеристики деревьев и местообитаний. Ценовые характеристики.	Рубки.	Индикаторы биоразнообразия.
8	MONTE (Monsu) [35]. Испания.	МОГ Лок. Рег.	СПР для лесного планирования.	Данные лесоустройства. Ценовые характеристики.	Рубки	Нет
9	Moses [19]. Австрия	М Лок.	Моделирование динамики многовидовых разновозрастных древостоев	Данные лесоустройства. Характеристики деревьев и местообитаний.	Рубки	Нет
10	Motti [41]. Финляндия	МО Лок.	Моделирование динамики древостоя и СПР для лесного планирования.	Данные лесоустройства. Экофизиологические характеристики деревьев. Ценовые характеристики.	Рубки, внесение удобрений, мелиорация.	Индикаторы биоразнообразия.
11	NED [46]. США	МОц Лок.	Платформа моделей для оценки, прогноза и лесного планирования на небольших территориях.	Данные лесоустройства. Экосистемные параметры. Правила лесопользования. Экономические и социальные параметры.	Л/х. Поражение древостоя насекомыми, болезнями; объединение побегов копытными. Локальные изменения климата. Загрязнение воздуха.	Индикаторы биоразнообразия, в т.ч. оценка местообитаний диких животных; оценка состояния водных ресурсов, продуктивности лесных экосистем.
12	PICUS [26]. Австрия	МГОц Лок. Рег.	Моделирование динамики многовидовых разновозрастных древостоев и почв. Моделирование углеродного, водного и азотного балансов лесных экосистем.	Эколого-физиологические характеристики деревьев. Данные лесоустройства. Характеристики почвы. Климатические региональные параметры.	Л/х. Локальные (засухи) и глобальные изменения климата. Поражение древостоя насекомыми.	Индикаторы биоразнообразия. Динамика углерода, азота. Оценка урожайности недревесной лесной продукции.

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
13	RAMAS [44]. США	МГОц Лок. Рег.	Моделирование состояния и динамики (мета)популяций во фрагментированном и изменяющемся лесном ландшафте. Анализ и выбор территорий для заповедания. Анализ рисков.	Характеристики популяций. Характеристики ландшафтов.	Л/х. Разнообразные антропогенные воздействия в зависимости от приложений.	Индикаторы биоразнообразия, в т.ч. оценка состояния популяций и местообитаний диких животных.
14	RMLANDS [25]. США	МГ Лок. Рег.	Моделирование антропогенных и природных нарушений и сукцессионных процессов в лесных ландшафтах.	Характеристики растительности, ландшафтные карты.	Л/х. Пожары и др. природные нарушения в зависимости от приложений.	Индикаторы биоразнообразия, в т.ч. оценка местообитаний диких животных, пространственные оценки.
15	SADfLOR [15]. Португалия	МОГОц Лок. Рег.	СПР для планирования лесного хозяйства по корковому дубу в Средиземноморье с учетом интересов общества.	Данные лесоустройства. Характеристики деревьев. Характеристики рельефа. Ценовые характеристики.	Рубки, снятие дубовой корки.	Индикаторы биоразнообразия.
16	SGIS [31]. Норвегия	МОГ Лок. Рег.	СПР для долгосрочного лесного планирования	Данные лесоустройства. Ценовые характеристики	Л/х.	нет
17	SIBYLA [14]. Словакия	МГ Лок.	Моделирование динамики древостоев.	Данные лесоустройства. Характеристики деревьев и местообитаний.	Рубки.	Индикаторы биоразнообразия.
18	SILVA [32]. Германия	МГ Лок.	Моделирование динамики многовидовых разновозрастных древостоев.	Данные лесоустройства. Характеристики деревьев и местообитаний. Ценовые характеристики.	Л/х. Ветровалы.	Индикаторы биоразнообразия.
19	SIMO [42]. Финляндия	МОГ Лок. Рег.	«Открытая» СПР для лесного планирования.	Данные лесоустройства, в т.ч. пространственные характеристики древостоя. Ценовые характеристики.	Л/х.	нет
20	TELSA [45]. Канада	МГОц Лок. Рег.	Платформа для ландшафтного моделирования с целью исследования роли различных нарушений в динамике растительности.	Информация о растительности, ландшафтах и нарушениях в зависимости от модели.	Л/х. Пожары, поражение древостоя насекомыми, болезнями, изменения климата.	Определяются конкретной моделью.
21	ToSIA [24]. Евросоюз	МОГОц Лок. Рег. Евр.	СПР для оценки устойчивости при экономических, экологических и социальных изменениях в цепи «лес-древесина»	Продукционные процессы, индикаторные значения, материальные потоки.	Изменения климата, состояние мирового рынка.	Экологические, экономические и социальные критерии и индикаторы.
22	VDDT [48]. Канада	МОц Лок. Рег.	Платформа для моделирования с целью исследования роли различных нарушений в динамике растительности.	Информация о растительности, местообитаниях и нарушениях в зависимости от модели.	Л/х. Пожары, поражение древостоя насекомыми, болезнями, изменения климата.	Определяются конкретной моделью.
23	Woodstock. Канада	МОГ Лок. Рег. Глоб.	Моделирование и анализ краткосрочного и долгосрочного управления лесами, в т.ч. лесного планирования, экосистемного управления и сохранения биоразнообразия.	Определяются конкретным приложением, наряду с экологическими, используются экономические и социальные параметры. Данные лесоустройства.	Л/х. Изменения климата.	Индикаторы биоразнообразия, пространственные оценки.

Примечания: *М – реализован модельный блок СПР, О – реализован блок оптимизации, Г – реализован блок ГИС, Оц – реализован блок оценки состояния объекта. Лок. – локальный, Рег. – региональный, Нац. – национальный, Евр. – европейский, Глоб. – глобальный. **Л/х – лесохозяйственные операции.

Таблица 2 - Российские модельные разработки для СПР в задачах управления лесами

N п/п	Название	Общая информация*	Решаемые задачи	Входные данные	Реализованные элементы внешних воздействий	Оценка индикаторов устойчивого управления лесами
1	2	3	4	5	6	7
1	Инструментарий для долгосрочного прогнозирования динамики породно-возрастной структуры лесов [2, 4]	МОГОц Рег. Нац.	Моделирование возникновения и распространения лесных пожаров; прогнозирование чрезвычайных лесопожарных ситуаций. Моделирование динамики породно-возрастной структуры лесов и оценка их ресурсно-экологического потенциала.	Данные по лесному фонду: породно-возрастной структуре лесов и структуре лесных земель. Нормативно-справочная информация по воздействиям на лесные экосистемы. Климатические прогнозы.	Л/х*. Пожары. Локальные (засухи) и глобальные изменения климата.	Эмиссия углерода. Оценка устойчивости лесных экосистем к пожарам. Оценка продуктивности лесов. Индикаторы биоразнообразия.
2	Модели лесознтомологического мониторинга [2, 8]	МООц Лок. Рег. Нац.	Моделирование динамики популяций лесных насекомых-филофагов, прогнозирование вспышек массового размножения насекомых в лесных насаждениях.	Данные по лесному фонду, учеты численности насекомых. Климатические прогнозы.	Поражение древостоя насекомыми, в т.ч. в условиях локальных (засухи) и глобальных изменений климата.	Оценка устойчивости лесных экосистем к вспышкам численности насекомых, в т.ч. в условиях изменения климата.
3	EFIMOD [3]	МГ Лок. Рег. Нац.	Моделирование динамики многовидовых разновозрастных древостоев и почв. Моделирование динамики углерода и азота в древостое и почве.	Эколого-физиологические характеристики деревьев. Данные лесоустройства. Характеристики почвы. Климатические региональные параметры.	Л/х. Распашки. Пожары. Массовые ветровалы. Глобальные изменения климата. Загрязнения.	Индикаторы биоразнообразия, в т.ч. разнообразие напочвенного покрова. Динамика углерода.
4	FORRUS-S [9]	МОГОц Лок. Рег. Нац.	Моделирование динамики многовидовых разновозрастных древостоев. Экономические оценки.	Региональные таблицы хода роста древостоев. Данные по световому минимуму деревьев. Данные лесоустройства. Экономические параметры.	Л/х.	Индикаторы биоразнообразия. Оценка рекреационного потенциала, урожайности недревесной лесной продукции. Оценка компонент радиационного, теплового, водного и углеродного балансов. Оценка влияния форм землепользования и климата на водный и углеродный баланс. Оценки динамики водного, теплового и углеродного балансов. Оценка общего стока, испарения, динамики снего- и влагозапасов почвы, динамика промерзания и оттаивания почвы.
5	Mixfor-SVAT, SVAT-Regio, Mixfor-3D [6]	МГ Лок. Рег.	Моделирование потоков тепла, воды, CO ₂ в лесных экосистемах. Моделирование микроклимата растительного покрова, динамики водного и теплового режима почвы.	Метеорологические данные. Физические свойства почвы. Биофизические свойства растительности. Рельеф, карты землепользования и почв.	Локальные и глобальные изменения климата. Изменение форм природопользования. Л/х. Ветровалы.	Оценки динамики водного, теплового и углеродного балансов. Оценка влияния форм землепользования и климата на водный и углеродный баланс. Оценки динамики водного, теплового и углеродного балансов. Оценка общего стока, испарения, динамики снего- и влагозапасов почвы, динамика промерзания и оттаивания почвы.
6	SWAP [1]	МОГ Лок. Рег. Нац. Глоб.	Моделирование динамики водного, теплового и углеродного балансов лесных экосистем и речных бассейнов	Гидрометеорологические данные. Данные по растительному покрову (в т.ч. лесоустроительные). Характеристики почвы.	Л/х. Наводнения. Засухи. Локальные и глобальные изменения климата.	Оценки динамики водного, теплового и углеродного балансов. Оценка общего стока, испарения, динамики снего- и влагозапасов почвы, динамика промерзания и оттаивания почвы.

Примечания: *М – реализован модельный блок СПР, О – реализован блок оптимизации, Г – реализован блок ГИС, Оц – реализован блок оценки состояния объекта. Лок. – локальный, Рег. – региональный, Нац. – национальный, Евр. – европейский, Глоб. – глобальный. **Л/х – лесохозяйственные операции.

и динамики многовидовых и разновозрастных древостоев (модели EFIMOD и FORRUS-S); моделирование динамики циклов элементов в системе «лес-почва» (модель EFIMOD), динамики водного, теплового и углеродного балансов лесных территорий с учетом динамики снего- и влагозапасов почвы, промерзания и оттаивания почвы (модель SWAP); трехмерное моделирование микроклимата, теплового и водного режимов лесного растительного покрова и почвы (модель Mixfog-3D).

В целом, и за рубежом, и в России, в настоящее время происходит резкое увеличение сложности разрабатываемых компьютерных систем, что определяется как потребностями устойчивого управления многофункциональным лесным хозяйством в условиях глобальных изменений, так и крупными современными достижениями в области информационных технологий (IT-технологий) (Reynolds K.M., 2005).

Особенности современного этапа развития СПР. Отличительными чертами современного этапа развития СПР являются:

(1) интеграция систем управления базами данных (СУБД, или в англоязычной литературе DBMS - DataBase Management System) и систем управления базами знаний (СУБЗ, или MBMS - Model Base Management System). СУБД позволяют пользователю найти необходимые данные, в то время как СУБЗ обеспечивают пользователю доступ к подходящим моделям и другим инструментам, необходимым для анализа. СПР должна позволять пользователю (а не только разработчику) подключать в систему новые данные и модели по мере необходимости;

(2) разработка специального класса СПР – пространственных *СПР* (SDSS – Spatial Decision Support System), которые, интегрируя пространственные возможности ГИС и СПР, позволяют моделировать пространственные компоненты данных и проводить их пространственный анализ. Это особенно актуально в связи с необходимостью в рамках организации устойчивого управления лесами решать проблемы на разных временных и пространственных шкалах, работать с данными из многих различных источников и зачастую вовлекать в процесс принятия решений множество заинтересованных сторон;

(3) техники и приемы решения многокритериальных задач интегрируются с пространственными СПР с тем, чтобы облегчить пользователю процесс принятия решений и найти компромисс между множественными и зачастую конфликтующими целями (см. например (Lexel M.J., 2005)). Развитие гибридных систем, объединяющих функциональность СПР и методы, развитые в области искусственного интеллекта - такие как нейронные сети, системы, основанные на знаниях (knowledge based systems), и экспертные системы - являются многообещающей областью дальнейшего развития СПР (Burststein F., 2008; Reynolds K.M., 2005)

(4) групповые *СПР* (GDSS - Group Decision Support Systems) для лесного управления, будучи до сих пор в начальной стадии развития независимыми рабочими группами, активно разрабатываются для поддержания процесса выработки решений по управлению лесными ресурсами с учетом интересов мно-

жества заинтересованных сторон (Davis L-S., 2007; Martins H., 2007 и др.)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПР в лесном хозяйстве за рубежом достаточно широко использовались в прошлые два десятилетия для планирования лесозаготовок, выбора лесохозяйственных операций и в отдельных случаях для управления лесами с целью снижения риска заболевания древостоя и поражения насекомыми-вредителями (см. <http://www.fs.fed.us/foresthealth/>, а также (Buongiorno J., 2003; Gordon S.N., 2007; Varma V.K., 2000). Применение СПР для более разнообразных и комплексных задач экосистемного управления и сохранения биоразнообразия до последних лет было ограничено. Однако, как ученые, так и практики в управлении лесами за рубежом хорошо понимали и понимают мощный потенциал СПР как инструмента, способного реально помочь в устойчивом управлении природными ресурсами, способного моделировать сложные комплексные процессы и интегрировать знания различных дисциплин (Rauscher H.M., 1999; Reynolds K.M., 2005). Обзор зарубежных и отечественных компьютерных систем поддержки принятия решений в лесном хозяйстве показал, что достаточно широкий круг задач может быть решен с использованием существующих систем. Вместе с тем, современные задачи организации экологически устойчивого лесного хозяйства в условиях глобальных изменений требуют развития существующих систем и объединения усилий на базе современных компьютерных технологий (Purves D., 2008; Reynolds K.M., 2003).

В лесном хозяйстве нашей страны компьютерные системы поддержки принятия решений пока не применяются, что обусловлено рядом причин. С одной стороны, СПР, непосредственно готовые к применению в российской практике лесного хозяйства, пока не разработаны. С другой стороны, научное сообщество, готовое к разработке таких систем, не имеет заказа от пользователей-управленцев, что снижает мотивацию для таких разработок. Однако совершенно очевидно, что проблемы устойчивого управления многофункциональным лесным хозяйством в условиях глобальных изменений могут успешно решаться только с применением СПР, позволяющих учитывать взаимовлияние множества факторов и интересов. С учетом уже существующих российских модельных разработок, вероятно, наиболее эффективным путем создания СПР для помощи в организации устойчивого лесного хозяйства России является объединение уже существующих лесных моделей на единой программной и технической базе – создание российской платформы лесных моделей с общим пользовательским интерфейсом и современными визуализационными возможностями.

Благодарности. Данная статья была инициирована научной дискуссией, развернувшейся в рамках рабочего семинара по российским лесным моделям и проблемам разработки СПР для лесного управления, который состоялся в ноябре 2007 г. в ЦЭПЛ РАН. Авторы искреннее благодарят всех, принявших участие в работе семинара и обсуждении затронутых

вопросов – прежде всего, акад. А.С. Исаева, проф. Е.М. Гусева, проф. А.С. Комарова, проф. Д.О. Логофета, проф. В.Г. Суховольского, д.б.н. С.И. Чумаченко, к.г.н. А.В. Ольчева. Авторы также благодарят Е.М. Гусева, А.С. Комарова и А.В. Ольчева за предоставление дополнительной информации по моделям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Моделирование процессов теплового, водного и углеродного обмена в экосистеме соснового леса // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 227-241.
- Исаев А.С., Коровин Г.Н., Лукина Н.В. и др. Катастрофические воздействия антропогенных и природных факторов на лесные экосистемы // В кн. «Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. 8т. / Пред. ред. кол. Н.П. Лавров. РАН. М.: ИФЗ РАН. 2008. Т.4: Процессы в биосфере: Изменение почвенно-растительного покрова и территориальных вод РФ, круговорот веществ под влиянием глобальных изменений и катастрофических процессов/ Отв.ред. Г.А. Заварзин, В.Н. Кудяров. Пушкино-Москва: ИФХ и БПП, ИФЗ РАН. 2008. С. 66-79.
- Комаров А.С., Чертов О.Г., Михайлов А.В. и др. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / Под ред. В.Н. Кудярова. М.: Наука. 2007. 380 с.
- Коровин Г.Н., Покрывайло В.Д., Солодовникова Н.И. Анализ и моделирование статистической структуры поля горимости лесов. Методические рекомендации. Л.: ЛенНИИЛХ. 1984. 64 с.
- Критерии и индикаторы устойчивого управления лесами Российской Федерации. М.: ВНИИЦлесресурс, 1998. 25 с.
- Ольчев А.В., Курбатова Ю.А., Варлагин А.В. и др. Модельный подход для описания переноса CO₂ между лесными экосистемами и атмосферой // Лесоведение. 2008. № 3. С. 3-13.
- Саати Т. Принятие решений – метод анализа иерархий. М.: «Радио и связь». 1993. 278 с.
- Суховольский В.Г., Исхаков Т.Р., Тарасова О.В. Оптимизационные модели межпопуляционных взаимодействий. Новосибирск: Наука. 2008. 168 с.
- Чумаченко С.И., Паленова М.М., Коротков В.Н. Прогноз динамики таксационных показателей лесных насаждений при разных сценариях ведения лесного хозяйства: модель динамики лесных насаждений FORRUS-S // Экология, мониторинг и рациональное природопользование / Научн. труды МГУЛ. Вып. 314. М.. 2001. С. 128-146.
- Buongiorno J., Gilles J.K. Decision methods for forest resource management. Academic Press. 2003. 439 p.
- Davis L-S., Johnson K.N., Bettinger P.S. et al. Forest management – to sustain ecological, economic and social values. 4th edition. McGraw Hill. 2001. 804 p.
- de Coligny F. Efficient building of forestry modelling software with the Capsis methodology // Fourcaud T., Zhang X.P. (eds.) Plant growth modeling and applications. Proc. of PMA06. Los Alamitos, California: IEEE Computer Society. 2008. P. 216-222.
- Ecological Applications. 2007. V. 17. N 1. P. 3-90.
- Fabrika M., Dursky Y.J. Algorithms and software solution of thinning models for SIBYLA growth simulator // Journal of Forest Science. 2005. V. 51. N 10. P. 431-445.
- Falcao A.O., Borges J.G. Designing decision support tools for Mediterranean forest ecosystems management: a case study in Portugal // Ann. For. Sci. 2005. V. 62. P. 751-760.
- Gordon S.N., Johnson K.N., Reynolds K.M. et al. Decision support systems for forest biodiversity. Evaluation of current systems and future needs. Project A10. Final Report. National commission on science and sustainable forestry. 2007.
- Handbook on Decision Support Systems 1, 2. (International Handbooks on Information Systems) / Burstein F., Holsapple C.W. (eds.) Springer-Verlag. 2008. 854 p.
- Hasenauer H. (ed.) Sustainable forest management: growth models for Europe. Springer. 2005. 389 p.
- Hasenauer H., Kindermann G., Steinmetz P. The tree growth model MOSES 3.0. // Hasenauer H. (ed.) Sustainable forest management: growth models for Europe. Springer. 2005. P. 64-70.
- Havis R.N., Crookston N.L. (eds.) Third Forest Vegetation Simulator Conference. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Rocky Mountain Research Station. 2008. 234 p.
- He H.S. Forest landscape models: definitions, characterization, and classification // Forest ecology and management. 2008. V. 254. N 3. P. 484-498.
- Hoen H.F., Solberg B. Forestry scenario modeling for economic analysis – experiences using the GAYA-JLP model // Paivinen R., Roihuvuo L., Siitonen M. (eds.). Large scale forestry scenario models: experiences and requirements. EFI Proceedings. 1996. N 5. P. 435-440.
- <http://ncseonline.org/ncssf/ds>
- Johnson K.N. FORPLAN version 1: an overview. Washington DC: USDA Forest Service. Land Management Planning Section. 1986. 85 p.
- Kallio A.M.I., Moiseyev A., Solberg B. The global forest sector model EFI-GTM- the model structure. EFI Technical Report. 2004. N 15.
- Lee B., Meneghin B., Turner M., Hoekstra T. An evaluation of landscape dynamic simulation models. Fort Collins, CO : USDA Forest Service. Inventory and Monitoring Institute. 2003.
- Lexer M.J., Honninger K. A modified 3D-patch model for spatially explicit simulation of vegetation composition in heterogeneous landscapes // Forest ecology and management. 2001. V. 144. P. 43-65.
- Lexer M.J., Vacik H., Palmethofer D. et al. Improving forestry extension services for smallscale private landowners in southern Austria with a computer based decision support tool // Computers and electronics in agriculture. 2005. V. 49. P. 81-102.
- Martins H., Borges J.G. Addressing collaborative planning methods and tools in forest management // Forest ecology and management. 2007. V. 248. P. 107-118.
- McCarter J.B., Wilson J.S., Baker P.J. et al. Landscape management through integration of existing tools and emerging technologies // Journal of forestry. 1998. P. 17-23.
- Mendoza G.A., Martins H. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: a critical review of methods and new modeling paradigms // Forest ecology and management. 2006. V. 230. P. 1-22.
- Naesset E. A spatial decision support system for long-term forest management planning by means of linear programming and a geographical information system // Scandinavian journal of forest research. 1997. V. 12. P. 77-88.
- Pretzsch H., Biber P., Dursky J. The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation // Forest ecology and management. 2002. V. 162. P. 3-21.
- Pretzsch H., Grote R., Reineking B. et al.. Models for forest ecosystem management: a European perspective // Annals of Botany. 2008. V. 101. P. 1065-1087.
- Pukkala T. (ed.). Multi-objective forest planning // Managing forest ecosystems. V. 6. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 2002. 207 p.
- Pukkala T. MONTE, calculation and planning program for even-aged and uneven-aged forest of Catalonia. User's guide. 2003. Joensuu, Finland.
- Purves D., Pacala S. Predictive models of forest dynamics // Science. 2008. V. 320. N 5882. P. 1452-1453.

- Rauscher H.M. Ecosystem management decision support for federal forests in the United States: a review // *Forest ecology and management*. 1999. V. 114. P. 173–197.
- Reynolds K.M. EMDS: Using a logic framework to assess forest ecosystem sustainability // *Journal of forestry*. 2001. V. 99. N 6. P. 26-30.
- Reynolds K.M., Borges J.G., Vacik H. et al. ICT in forest management and conservation // Hetemaki L., Nilsson S. (eds.) *Information technology and the forest sector*. IUFRO World Series. 2005. V. 18. P. 150-171.
- Reynolds K.M., Hessburg P.F. Decision support for integrated landscape evaluation and restoration planning // *Forest ecology and management*. 2003. V. 207. P. 263–278.
- Salminen H., Lehtonen M., Hynynen J. Reusing legacy FORTRAN in the MOTTI growth and yield simulator // *Computers and electronics in agriculture*. 2005. V. 49. N 1. P. 103-113.
- Siitonen M., Anola-Pukkila A., Haara A. et al. (eds.) *MELA Handbook 2000 Edition*. // The Finnish Forest Research Institute. - 2001. - 498 p.
- SIMO – adaptable simulation and optimization for forest management planning. Kangas A., Rasinmaki J. (eds.) University of Helsinki. Department of forest resource management. Publications 41. 2007.
- Species conservation and management: case studies. Akcakaya H.R., Burgman M., Kindvall O., Wood C., Sjogren-Gulve P., Hatfield J., McCarthy M. (eds.) Oxford University. 2004.
- TELSA - Tool for Exploratory Landscape Scenario Analyses: User's guide, version 3.3. ESSA Technologies Ltd. Vancouver BC. 2005. 236 p.
- Twery M.J., Rauscher H.M., Bennett D.J. et al. NED-1: Integrated analyses for forest stewardship decisions // *Computers and electronics in agriculture*. 2000. V. 27. P. 167–193.
- Varma V.K., Ferguson I., Wild I. Decision support system for the sustainable forest management // *Forest ecology and management*. 2000. V. 128. P. 49-55.
- Vegetation Dynamics Development Tool: User guide, version 6.0. ESSA Technologies Ltd. Vancouver BC. - 2007. - 196 p.
-

Поступила в редакцию 13 марта 2009 г.
Принята к печати 8 июня 2009 г.