

УДК 004.89

РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПОНЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПЛАТФОРМЕ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ, ОСНОВАННЫХ НА ЗНАНИЯХ

Столбов Александр Борисович

к.т.н., м.н.с., e-mail: stolboff@icc.ru

Лемперт Анна Ананьевна

к.ф.-м.н., в.н.с, e-mail: lempert@icc.ru

Павлов Александр Иннокентьевич

к.т.н., с.н.с., e-mail: asd@icc.ru

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

Аннотация. В статье исследуются проблемы автоматизации и интеллектуальной поддержки процесса математического и имитационного моделирования сложных объектов за счёт комбинации компонентно-ориентированного и онтологического подходов. В качестве основной прикладной области для применения обсуждаемых методов и средств предполагается использовать такое направление, как комплексное моделирование окружающей среды. В контексте изучаемых вопросов рассмотрены современные подходы к автоматизации компонентно-ориентированного моделирования. При интеграции компонентов-моделей в единую результирующую комплексную модель разработчику необходимо не только обеспечить формальное согласование со стандартами используемого каркаса моделирования, но и учитывать различные типы семантической и синтаксической неоднородности компонентов. В связи с этим выполнена классификация типов интеграции комплексных моделей, обсуждаются особенности реализации компонентно-ориентированного моделирования в авторской платформе создания систем, основанных на знаниях. В качестве иллюстративного примера рассматривается гидролого-экологическая балансовая модель.

Ключевые слова: компонентно-ориентированное моделирование, комплексная модель, сценарный анализ, онтологии, системы на основе знаний.

Цитирование Столбов А.Б., Лемперт А.А., Павлов А.И. Реализация компонентно-ориентированного моделирования в платформе создания систем, основанных на знаниях // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 4 (24). С. 21-30. DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.002.

Введение. За последние годы разработчики и пользователи математических и имитационных моделей получили доступ к новым возможностям, которые предоставляют современные информационно-коммуникационные технологии (ИКТ). Помимо наблюдаемой длительной устойчивой тенденции к увеличению вычислительной мощности и пропускной способности программно-аппаратных средств, новые ИКТ развивают и изменяют сам подход к разработке моделей. В области работы с данными появились новые средства сбора и хранения информации. С одной стороны, можно организовать автономный, удалённый, относительно дешёвый мониторинг за объектом (беспроводные технологии, беспилотные системы). С другой стороны данные размещаются в открытых электронных ресурсах вместе с их семантическим описанием, что резко увеличивает уровень их доступности, как для анализа человеком, так и для средств компьютерной обработки. В области исследовательского инструментария современные системы лицензирования и стандартизации стимулируют обмен результатами научной деятельности: позволяют легально использовать и внедрять в своих разработках разнообразные электронные информационные ресурсы, данные вычислений и программные библиотеки. В области коммуникации современные средства позволяют преодолеть территориальную разобщённость и языковые различия. Таким образом, в настоящее

время возможности ИКТ вносят существенный вклад в традиционный процесс создания и внедрения моделей, расширяют область их использования, обогащают опыт их применения.

Новые возможности современных ИКТ позволяют изначально организовать процесс разработки модели с учётом необходимости взаимодействия между субъектами и объектами моделирования. В этом направлении активно развивается подход компонентно-ориентированного моделирования. Под компонентом понимается программный модуль, реализующий алгоритм вычислений в определенном каркасе (фреймворке) моделирования. Как правило, каркас моделирования создаётся и поддерживается небольшой группой разработчиков, а заинтересованным исследователям предоставляется возможность формировать предметные модели в соответствии со стандартом этого каркаса. Методы и средства компонентно-ориентированного моделирования применяются для решения задач совместимости как на этапе проектирования, так и на этапе вычислений.

В этих условиях задача поддержки процесса моделирования приобретает новое и важное значение. Одним из ключевых этапов здесь является интеграция моделей в единую результирующую комплексную модель. При этом в решении задач, непосредственно связанных с техническими вопросами интеграции моделей, достигнуты серьёзные теоретические и практические успехи, которые, как правило, зависят от соответствующих достижений в области программной инженерии. Более интересным и перспективным направлением научного поиска в настоящее время является задача автоматизации и интеллектуализации процесса связывания (coupling) моделей, учитывающая предметный смысл компонентов моделей и комплексной модели, контекст проектирования и особенности эксплуатации. Для решения этой задачи авторами используется онтологический подход, который хорошо зарекомендовал себя в случаях, когда необходимо формализовать и структурировать знания для последующей автоматической (или полуавтоматической) компьютерной обработки.

Статья является логическим развитием работы [1] и продолжает анализ методов и средств компонентно-ориентированного моделирования для создания комплексных моделей окружающей среды. Особое внимание уделяется типам интеграции моделей и особенностям их реализации в авторской платформе создания систем, основанных на знаниях.

Компонентно-ориентированное моделирование и комплексное моделирование окружающей среды. Идеи компонентного моделирования и проектирования широко востребованы в разных областях знаний и основаны на общефилософских понятиях анализа, синтеза, декомпозиции и т.п. В данной статье компонентное моделирование рассматривается применительно к задачам математического и имитационного моделирования, возникающих при комплексном моделировании окружающей среды. Тем не менее основные выводы и предложения могут быть применимы и к другим предметным и проблемным областям.

Комплексное моделирование окружающей среды (IEM – Integrated Environmental Modeling) [2, 3] – относительно новая (активно развивается последние 20 лет) научная дисциплина, изучающая взаимосвязь основных характеристик общества и экономики с биосферой и атмосферой в рамках единой модельной структуры. Отличительной особенностью IEM является направленность на достижение практических результатов и получение готовых к использованию рекомендаций, которые могли бы быть реализованы специалистами из государственных органов для решения проблем окружающей среды. В связи с этим важно найти баланс между вычислительной возможностью проведения многовариантных расчётов с интерпретируемыми результатами и комплексным охватом проблемы, по возможности учитывающий всё многообразие взаимодействующих объектов и субъектов. Именно необходимость вовлечения групп локальных коллективов с компетенциями из разных сфер научной и практической деятельности стимулирует активное использование компонентного подхода при решении задач IEM.

Комплексная модель состоит из двух или более отдельных и разделяемых моделей, связанных общим вычислительным каркасом, чтобы обеспечить автоматическое взаимодействие между моделями. С учётом такого определения комплексная модель может быть монодисциплинарной, т.е. охватывать лишь несколько процессов из одной области. Практико-ориентированный подход ИЕМ неизбежно требует всесторонней оценки изучаемого явления, использования множества дополняющих друг друга моделей. Таким образом, в конечном итоге ИЕМ занимается изучением *системы систем* (system of systems) [4] – иерархической структуры с разными уровнями абстракции, где системы и индикаторы на более низких уровнях могут масштабироваться до более высоких уровней.

Существующие в настоящее время стандарты каркасов моделирования [5, 6] основаны на принципах программной инженерии и созданы с целью обеспечить взаимодействие модулей во время выполнения расчётов. При этом, чем дальше комплексная модель от монодисциплинарной, тем больше возникает факторов семантической неопределенности. Эти факторы напрямую не связаны с автоматизацией вычислений, но их необходимо учитывать при интеграции компонентов. Далее рассмотрим эту проблему более подробно.

Типы интеграции в компонентно-ориентированном моделировании и проблемы связывания. Наиболее проработанный тип интеграции моделей – *техническое связывание*. Здесь необходимо обеспечить возможность запуска комплексной модели, т.е. организовать вычисления на основе цепочки моделей. К типовым проблемам, которые решаются при техническом связывании, относятся: автоматический обмен данными между моделями; регулярная повторяемость и воспроизводимость прогонов цепочки моделей; оптимизация исполнения моделей на разных вычислительных устройствах и архитектурах. Техническое связывание может быть реализовано различными способами.

- Без автоматизации. Информация между моделями передаётся через файлы, которые в ручном режиме подвергаются переформатированию и другой обработке, в т.ч. с использованием внешних редакторов (текстовых, табличных, XML и т.п.). Запуск различных моделей также осуществляется пользователями.
- Программа-сценарий (скрипт) автоматизирует преобразование входных файлов и запуск вычислений.
- Модель-программа осуществляет встроенное жёсткое связывание моделей в одну неделимую модель. Передача входных файлов и переменных происходит с использованием единого пространства памяти. Обеспечивается возможность обратной связи между моделями.
- Закрытый каркас моделирования обеспечивает встроенный механизм слабого связывания. Модели взаимозаменяемы, а механизм соединения специфичен для множества объединяемых моделей и/или для группы разработчиков.
- Открытый каркас моделирования, ориентированный на стандарты. Модели связаны как независимые компоненты, обмениваются данными стандартизированным способом.

Наибольший интерес и перспективу в настоящее время представляют открытые каркасы, которые изначально разрабатывались с целью применения большим сообществом разработчиков моделей. Можно выделить два основных типа каркасов моделирования:

- сервисно-ориентированные каркасы, в которых модели оформляются в виде веб-сервисов и для их связывания используются стандартные текстовые протоколы;
- компонентно-ориентированные каркасы, в которых каждая модель запускается как независимый компонент, обмен данными между моделями осуществляется на основе стандартного интерфейса.

В качестве примера, иллюстрирующего возможности компонентно-ориентированных каркасов для технического связывания, рассмотрим стандарт OpenMI (Open Modeling Interface) [5]. Этот стандарт активно используется в области моделирования водных ресурсов и поддерживается множеством программных средств моделирования и поддержки принятия решений (SOBEK 2: гидродинамические модели, Delft3D: гидродинамика на поверхности, Wanda 4: трубопроводная гидродинамика, MASCARET: гидродинамика потоков 1D, RFSEM-EDA: 2D гидродинамика на поверхности, Impact Calculator: оценка потерь от наводнения, ISIS: моделирование рек и риска наводнений, InfoWorks: гидрологическое моделирование городского водного цикла). К ключевым характеристикам OpenMI относятся:

- два типа реализации модели-компонента: оболочка/фасад или поддержка программного интерфейса OpenMI непосредственно из модели;
- однонаправленные и двунаправленные связи между компонентами: различные варианты функций запроса и возврата данных;
- два типа событий: изменение статуса компонента, изменение значения элемента, участвующего в обмене информацией между компонентами.

Таким образом, при техническом связывании вся ответственность за согласование понятийного и методологического аппарата перекладывается на разработчика моделей. Для того, чтобы повысить уровень интеллектуализации процесса проектирования комплексной модели, введём ещё два типа интеграции: концептуальное (понятийное) и методологическое связывание.

Концептуальное связывание обеспечивает формирование единого расширяемого понятийного пространства, интерпретируемого как исследователями, так и компьютерными программами. К типовым проблемам, которые решаются при концептуальном связывании относятся:

- согласование понятий между дисциплинами, используемыми в моделях, для описания: уравнений, переменных, параметров, единиц измерения;
- формирование цепочки моделей, обеспечивающей содержательные связи между моделями и соответствующую проверку ограничений;
- масштабирование по единицам измерения;
- создание простых преобразователей для устранения несоответствия ввода/вывода.

Методологическое связывание направлено на согласование используемых методологий и соответствующее изменение моделей. Методологическое связывание развивает результаты концептуального связывания и добавляет в рассмотрение знания, связанные со свойствами моделей-компонентов в целом (а не только входы/выходы) и свойствами групп моделей. Реализуя методологическое связывание, разработчик рассматривает комплексную модель с точки зрения подхода *системы систем*, учитывая особенности методов моделирования и контекста внедрения моделей. К типовым проблемам, которые решаются при семантическом связывании относятся:

- пространственное масштабирование;
- масштабирование по времени;
- организационное (индивид, группа) масштабирование;
- создание сложных преобразователей для разрешения неопределенностей, как на уровне входов и выходов, так и на уровне компонентов-модели в целом.

Таким образом, при проектировании современного средства компонентно-ориентированного моделирования необходимо учитывать, что для реализации последних двух рассмотренных типов интеграции требуется явным образом обрабатывать знания предметной и проблемной областей. Поэтому в качестве инструментального средства разработки

комплексных моделей предлагается развить и дополнить авторскую платформу [7] создания систем, основанных на знаниях.

Реализация связывания моделей в платформе создания систем, основанных на знаниях. Ключевыми характеристиками используемой платформы являются: веб-ориентированная компонентная открытая клиент-серверная архитектура [7]; возможность интеграции внешних проблемно-ориентированных инструментов в прикладную систему, основанную на знаниях (СОЗ); центральная роль концептуальной модели в процессе разработки; использование потока работ для интеграции и сборки компонентов в прикладную СОЗ [8]. К настоящему времени разрабатываются более 10 системных, базовых, прикладных и вспомогательных компонентов. Системные компоненты обеспечивают общую функциональность программного обеспечения: компонент управления данными предоставляет операции для унифицированной обработки данных и в настоящее время реализован для базы данных PostgreSQL; компонент коммуникации выполняет двунаправленное взаимодействие в архитектуре клиент-сервер; компонент графического пользовательского веб-интерфейса [9] содержит расширяемую библиотеку элементов управления с предопределенными шаблонами взаимодействия клиент-сервер; компонент потока работ может использоваться либо для создания схемы сборки компонентов платформы, либо для описания некоторого императивного поведения, используемого в блоках принятия решений. На основе функциональности системных компонентов базовые компоненты решают задачи, связанные с обработкой знаний. Так, редактор онтологий берёт на себя всю основную работу с концептуальными моделями (концепция, отношение, атрибут, экземпляр): хранение данных, редактирование, визуальное представление и т.п. Компонент рассуждений на основе правил реализует задачи, связанные с созданием баз знаний. При этом концептуальная модель выступает в качестве исходного источника информации для разработки шаблонов фактов. Этот компонент предоставляет оригинальный визуальный инструмент для разработки правил, генерации кода и выполнения рассуждений на основе систем логического вывода Drools и Clips. Вспомогательные компоненты разработаны для обработки специальных типов информации: геоданных и многомерных наборов данных.

В предыдущей работе авторов [1] был представлен прототип концептуальной модели компонентно-ориентированного сценарного моделирования (КМ КОСМ), адаптирующий информацию из нескольких тематических онтологий [10-13]. При этом в качестве базовой модели использовалась онтология водных ресурсов [10]. КМ КОСМ представляет собой многослойную расширяемую онтологию и включает: ресурсный уровень (информация о компоненте и его разработчиках); технический уровень (информацию о требованиях компонента к вычислительной среде и программному обеспечению); связующий уровень (описание входов и выходов компонента, поддерживаемого интерфейса и архитектуры каркаса); математический уровень (онтология математических структур и методов); предметный уровень (модель предметной области на примере водных ресурсов).

На основе информации из КМ КОСМ возможны несколько вариантов реализации интеграции моделей в платформе.

Во-первых, пользователь может осуществлять запросы к онтологии для выбора соответствующих моделей для формируемой ситуации. Описанный способ подойдёт для анализа принципиальной возможности концептуального и методологического связывания без непосредственного технического, что является существенным недостатком. Ещё одним ограничением этого варианта является низкий уровень автоматизации, поскольку сами запросы будут слабо формально связаны, и именно пользователь должен организовать цепочки запросов и понять, какой запрос является наиболее подходящим.

Во-вторых, спецификация технического связывания может формироваться в редакторе онтологий платформы, а концептуальное и методологическое связывание будет выполняться с использованием специальной базы знаний, содержащей правила проверки условий интеграции и предоставления рекомендаций по выбору правильных элементов. Идеи применения платформы для сценарного моделирования с использованием баз знаний рассмотрены в предыдущей публикации авторов [14]. Недостатком этого варианта является низкий уровень интерактивности и сложности в разработке самой базы знаний для комплексных моделей типа система систем.

Третьим вариантом является использование компонента потока работ (workflow). По сравнению с предыдущими способами этот вариант ориентирован на обеспечение технического связывания. Модели регистрируются в платформе как внешние программные модули, а комплексная модель формируется из них в редакторе потока с использованием связей, отражающих потоки данных и управления. Поддержка процесса вычислений осуществляется компонентом потока работ. Недостатком этого варианта является лишь частичная поддержка концептуального связывания и отсутствие методологического связывания. Так, в рамках базовой функциональности компонента потока работ возможно накладывать ограничения только на типы связи: понятие, отношение или экземпляр онтологии, а также литеральные данные (число, текст), а содержательный смысл передается только названиями элементов. Для устранения указанного недостатка в ближайшем будущем планируется создание новой функциональности – семантического связывания, реализующего концептуальное и методологическое связывание за счёт комбинации методов онтологического подхода и потока работ. В рамках данной статьи далее приводится пример технического и концептуального связывания, использующего доступные к настоящему времени возможности потока работа.

Пример компонентов комплексной модели. В качестве иллюстративного примера рассмотрим упомянутую в предыдущей публикации [1] широко известную комплексную модель для расчета изменения гидролого-экологических характеристик устьев рек [15]. Фрагмент потока работ, отражающий взаимосвязь компонентов комплексной модели, представлен на рис. 1.

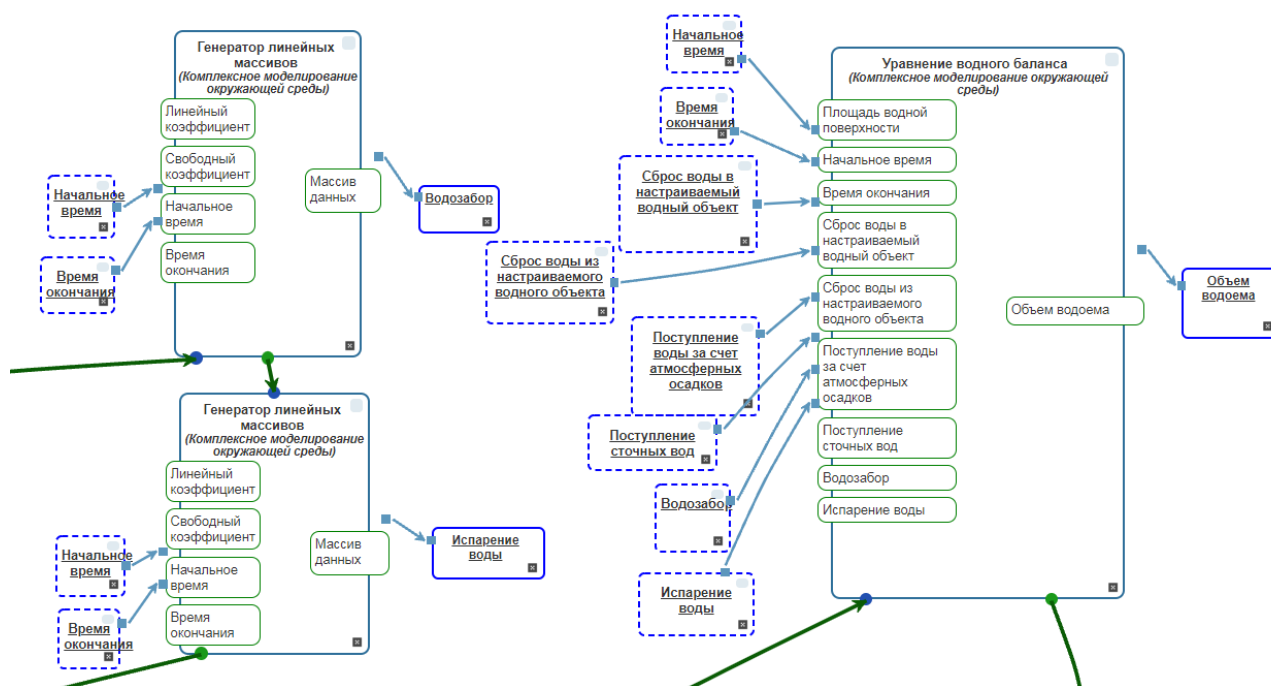


Рис. 1. Поток работ для комплексной балансовой модели (фрагмент).

С математической точки зрения эта модель представляет собой систему линейных

обыкновенных дифференциальных уравнений, что позволяет представить слагаемые каждого уравнения как экземпляры компонента-модели, спецификация которого описывается в терминах КМ КОСМ. С точки зрения проведения расчётов компонент-модель – это программный модуль, реализующий алгоритм вычислений в определенном каркасе моделирования. Для тестирования технического связывания программные модули, соответствующие элементам комплексной гидролого-экологической модели, были запрограммированы на языке Java и добавлены в платформу, как внешние модули.

Согласно структуре модели [15], разработаны следующие компоненты-модели: расход воды источника, питающий водный объект; расход воды притоков; расход воды от сбросов сточных вод; поступления воды с атмосферными осадками на поверхность водного объекта; расход искусственно забираемой воды из водного объекта при водозаборе; потери воды на испарения с поверхности водного объекта; расход воды в смежных водоёмах; расходование вещества вследствие его разложения; расходование вещества вследствие его потребления организмами; убыль вещества на дне; поступление вещества со дна; поступление вещества как преобразование других веществ; поступление вещества как продукт биохимических процессов; группа компонентов для моделирования поступления/убыли характерного вещества вместе с расходом воды. Перечисленные компоненты-модели описаны в КМ КОСМ: экземпляры этих компонентов в своих свойствах и через отношения с другими экземплярами описывают ситуации для конкретного водного объекта, предприятия, организма и т.п.

Для выполнения вычислительных экспериментов в дополнение к описанным балансовым компонентам-моделям были разработаны компоненты-модели, генерирующие необходимые для вычислений входные данные. В свою очередь, в качестве входных данных для выполнения генерации использовались общедоступная статистическая информация о гидрологических характеристиках водного объекта и экспертные оценки.

Процесс тестирования, связанный с проектированием комплексной модели и выполнением расчётов, подтвердил имеющиеся предположения: с одной стороны, была продемонстрирована принципиальная осуществимость технического связывания, с другой стороны, были выявлены недостатки, связанные с реализацией концептуального связывания в компоненте потока работа.

Заключение. Статья посвящена проблеме автоматизации и интеллектуальной поддержки процесса математического и имитационного моделирования сложных объектов за счёт комбинации компонентно-ориентированного и онтологического подходов. Проведён аналитический обзор методов и средств компонентно-ориентированного моделирования, используемых в области комплексного моделирования окружающей среды. Выделены три класса задач интеграции моделей-компонентов: техническое связывание (согласование по данным для запуска цепочки моделей), концептуальное связывание (согласование понятийного аппарата при связывании моделей), методологическое связывание (согласование методов моделирования; пространственное, временное и организационное масштабирование). В контексте изучаемых вопросов проанализированы варианты реализации связывания моделей в авторской платформе создания систем, основанных на знаниях. В тестовом режиме реализована техническая интеграция комплексной модели для расчета изменения гидролого-экологических характеристик устьев рек.

Благодарности. Результаты получены в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту «Теоретические основы, методы и высокопроизводительные алгоритмы непрерывной и дискретной оптимизации для поддержки междисциплинарных научных исследований» (№ гос. регистрации: 121041300065-9), «Методы и технологии облачной сервис-ориентированной цифровой платформы сбора, хранения и обработки больших объёмов разноразмерных междисциплинарных данных и знаний, основанные на применении искус-

ственного интеллекта, модельно-управляемого подхода и машинного обучения» (№ гос регистрации: 121030500071-2), а также при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-47-380001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лемперт А.А., Столбов А.Б., Козлов В.В. Использование онтологического подхода для интеллектуальной поддержки сценарного моделирования водных объектов Приангарья // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 3 (19). С. 14-24.
2. Argent R. An overview of model integration for environmental applications – Components, frameworks and semantics // Environmental Modelling & Software. 2004. Vol. 19. №3. P. 219-234. DOI: 10.1016/S1364-8152(03)00150-6.
3. Moore R., Hughes A. Integrated environmental modelling: Achieving the vision // Geological Society, London, Special Publications. 2016. Vol. 408. P. 17-34. DOI: 10.1144/SP408.12.
4. Iwanaga T., Wang H.H., Hamilton S.H., Grimm V., Koralewski T.E., Salado A., Elsayah S., Razavi S., Yang J., Glynn P., Badham J., Voinov A., Chen M., Grant W.E., Peterson T.R., Frank K., Shenk G., Barton C.M., Jakeman A.J., Little J.C. Socio-technical scales in socio-environmental modeling: Managing a system-of-systems modeling approach // Environmental Modelling & Software. 2021. Vol. 135. P. 104885. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104885.
5. Harpham Q., Hughes A., Moore R.V. Introductory Overview: The OpenMI 2.0 Standard for Integrating Numerical Models // Environmental Modelling & Software. 2019. Vol. 122. P. 104549. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.104549.
6. Syvitski J., Hutton E., Peckham S., Slingerland R. CSDMS – A modeling system to aid sedimentary research // Sedimentary Geology. 2011. Vol. 9. №1. P. 4–9. DOI: 10.2110/sedred.2011.1.4.
7. Nikolaychuk O.A., Pavlov A.I., Stolbov A.B. The software platform architecture for the component-oriented development of knowledge-based systems // Proceedings of the 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). 2018. P. 1234-1239.
8. Pavlov A.I., Stolbov A.B., Dorofeev A.S. The workflow component of the knowledge-based systems development platform // CEUR Workshop Proceedings, 2nd Scientific-Practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems, ITAMS 2019. Vol. 2463. P. 47-58.
9. Pavlov A.I., Stolbov A.B. Domain-oriented specialization tools for knowledge-based systems development platform // CEUR Workshop Proceedings, 3rd Scientific-Practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems, ITAMS 2020. Vol. 2677. P. 59-69.
10. Elag M., Goodall J.L. An ontology for component-based models of water resource systems // Water Resources Research. 2013. Vol. 49. P. 5077–5091. DOI: 10.1002/wrcr.20401.
11. Horsburgh J., Tarboton D., Maidment D., Zaslavsky I. A relational model for environmental and water resources data // Water Resources Research. 2008. Vol. 44. №5. P. W05406. DOI: 10.1029/2007WR006392.
12. Nevzorova O.A., Zhiltsov N., Kirillovich A., Lipachev E. OntoMathPRO Ontology: A Linked Data Hub for Mathematics // Communications in Computer and Information Science. 2014. Vol. 468. P. 105-119. DOI: 10.1007/978-3-319-11716-4_9.

13. Raskin R., Pan M. Knowledge representation in the Semantic Web for Earth and Environmental Terminology (SWEET) // Computers & Geosciences. 2005. Vol. 31. №9. P. 1119-1125. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.12.004.
14. Pavlov A.I., Stolbov A.B. The Application of the Knowledge-Based Systems Development Platform for Creating Scenario Analysis Support Tools // Proceedings of the VIth International Workshop 'Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security (IWCI 2019). Advances in Intelligent Systems Research. 2019. Vol. 169. P. 43-48.
15. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М.: Изд-во МГУ. 1998. 176 с.

UDC 004.89

**TOWARDS IMPLEMENTATION OF COMPONENT-BASED MODELING
IN THE PLATFORM FOR CREATING KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS**

Alexander B. Stolbov

Ph. D., junior researcher, e-mail: stolboff@icc.ru

Anna A. Lempert

Ph. D., leading researcher, e-mail: lempert@icc.ru

Alexander I. Pavlov

Ph. D., senior senior, e-mail: asd@icc.ru

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
664033, Irkutsk, Russia, Lermontov Str., 134.

Abstract. The article considers the problems of automation and intellectual support of the mathematical and simulation modeling process of complex objects via a combination of component-based and ontological approaches. As the main application area for the discussed methods and tools, it is proposed to use the integrated environmental modeling domain. In this context, modern approaches to the automation of component-based modeling are considered. To couple model components into a final complex model, the developer needs not only to ensure formal agreement with the standards of the modeling framework but also to take into account various types of semantic and syntactic heterogeneity of components. In this regard, the classification of the integration types for complex modeling is carried out, the related implementation features in the author's platform for creating knowledge-based systems are discussed. The hydrological-ecological balance model is considered an illustrative example.

Keywords: component-based modeling, coupling problems, scenario analysis, ontologies, knowledge-based systems

REFERENCES

1. Lempert A.A., Stolbov A.B., Kozlov V.V. Ispol'zovanie ontologicheskogo podhoda dlya intellektual'noj podderzhki scenarnogo modelirovaniya vodnyh ob"ektov Priangar'ya [The ontological approach application for intellectual support of scenario modeling of water objects in the angara region] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2020. № 3 (19). P. 14-24. (in Russian)
2. Argent R. An overview of model integration for environmental applications—Components, frameworks and semantics // Environmental Modelling & Software. 2004. Vol. 19. №3. P. 219-234. DOI: 10.1016/S1364-8152(03)00150-6.
3. Moore R., Hughes A. Integrated environmental modelling: Achieving the vision // Geological Society, London, Special Publications. 2016. Vol. 408. P. 17-34. DOI: 10.1144/SP408.12.

4. Iwanaga T., Wang H.H., Hamilton S.H., Grimm V., Koralewski T.E., Salado A., Elsawah S., Razavi S., Yang J., Glynn P., Badham J., Voinov A., Chen M., Grant W.E., Peterson T.R., Frank K., Shenk G., Barton C.M., Jakeman A.J., Little J.C. 2021. Socio-technical scales in socio-environmental modeling: Managing a system-of-systems modeling approach // *Environmental Modelling & Software*. 2021. Vol. 135. P. 104885. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104885.
5. Harpham Q., Hughes A., Moore R.V. Introductory Overview: The OpenMI 2.0 Standard for Integrating Numerical Models // *Environmental Modelling & Software*. 2019. Vol. 122. 104549. P. 1-13. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.104549.
6. Syvitski J., Hutton E., Peckham S., Slingerland R. CSDMS - A modeling system to aid sedimentary research // *Sedimentary Geology*. 2011. Vol. 9. №1. P. 4-9. DOI: 10.2110/sedred.2011.1.4.
7. Nikolaychuk O.A., Pavlov A.I., Stolbov A.B. The software platform architecture for the component-oriented development of knowledge-based systems // *Proceedings of the 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. 2018. P. 1234-1239.
8. Pavlov A.I., Stolbov A.B., Dorofeev A.S. The workflow component of the knowledge-based systems development platform // *CEUR Workshop Proceedings, 2nd Scientific-Practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems, ITAMS 2019*. Vol. 2463. P. 47-58.
9. Pavlov A.I., Stolbov A.B. Domain-oriented specialization tools for knowledge-based systems development platform // *CEUR Workshop Proceedings, 3rd Scientific-Practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems, ITAMS 2020*. Vol. 2677. P. 59-69.
10. Elag M., Goodall J.L. An ontology for component-based models of water resource systems // *Water Resour. Res.* 2013. №49. P. 5077-5091. DOI: 10.1002/wrcr.20401.
11. Horsburgh J., Tarboton D., Maidment D., Zaslavsky I. A relational model for environmental and water resources data // *Water Resources Research*. 2008. Vol. 44. №5. P. W05406. DOI: 10.1029/2007WR006392.
12. Nevzorova O.A, Zhiltsov N., Kirillovich A., Lipachev E. OntoMathPRO Ontology: A Linked Data Hub for Mathematics // *Communications in Computer and Information Science*. 2014. Vol. 468. P. 105-119.
13. Raskin R., Pan M. Knowledge representation in the Semantic Web for Earth and Environmental Terminology (SWEET) // *Computers & Geosciences*. 2005. Vol. 31. №9. P. 1119–1125. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.12.004.
14. Pavlov A.I., Stolbov A.B. The Application of the Knowledge-Based Systems Development Platform for Creating Scenario Analysis Support Tools // *Proceedings of the VIth International Workshop 'Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security (IWCI 2019)*. *Advances in Intelligent Systems Research*. 2019. Vol. 169. P. 43-48.
15. Mihajlov V.N. *Gidrologiya ust'ev rek [Hydrology of river mouths]*. M.: Izd-vo MGU. 1998. 176 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 13.12.2021; одобрена после рецензирования 16.12.2021; принята к публикации 21.12.2021.

The article was submitted 13.12.2021; approved after reviewing 16.12.2021; accepted for publication 21.12.2021.