

УДК: 57.033,045; 574.42,45; 630*114.351; 630*182.21

Интеграция имитационных моделей для комплексной оценки экосистемных услуг лесов: методические подходы

**Грабарник П.Я.^{*1}, Чертов О.Г.², Чумаченко С.И.³, Шанин В.Н.^{1,4,5},
Ханина Л.Г.⁵, Бобровский М.В.^{1,5}, Быховец С.С.¹, Фролов П.В.¹**

¹*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения, ФИЦ ПНЦБИ
РАН, Пушкино, Россия*

²*Бингенский технический университет, Бинген, Германия*

³*Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищи, Россия*

⁴*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия*

⁵*Институт математических проблем биологии РАН – филиал Института прикладной
математики им. М.В. Келдыша РАН, Пушкино, Россия*

Аннотация. Для решения задач моделирования сложных экологических систем разработано большое число компьютерных моделей: от простейших, которые лишь грубо описывали исследуемую систему, до достаточно детализированных, позволяющих изучать поведение большого числа взаимодействующих элементов одновременно. Развитие взглядов на структуру и закономерности функционирования экосистем, совершенствование вычислительной техники, технологий программирования и математического аппарата создают предпосылки для нового этапа в развитии моделирования в экологии. Если раньше математические модели, будучи сильно генерализованными, создавались отдельными учеными или небольшими группами, то в настоящее время разработка комплексных моделей невозможна без привлечения опыта многих коллективов исследователей, использующих разнообразный арсенал методов и знаний, накопленных в лесоведении, экологии, физиологии растений, почвоведении, климатологии, и других науках. В рамках решения задачи по интеграции нескольких экологических моделей было разработано программно-техническое решение на основе специального протокола обмена данными и выработаны методические основы для интеграции моделей. Создана система на основе динамической модели древостоя FORRUS-S, модели динамики органического вещества почвы Romul_Hum, статистического генератора гидротермических условий почвы SCLISS и модели биологического разнообразия BioCalc для комплексной оценки динамики компромиссов и синергии при разных сценариях лесопользования. Выполнен прогноз динамики запасов древесины, почвенных пулов углерода и биологического разнообразия растительности на уровне участкового лесничества.

Ключевые слова: *лесные экосистемы, динамические модели, лесоводственные модели, почвенные модели, процессные модели, интеграция.*

* pavel.grabarnik@gmail.com

Экологи и специалисты социально-экономического блока наук сталкиваются с задачей моделирования сложных экологических, социо-экологических и экономических систем, чтобы исследовать их поведение при тех или иных сценариях. Переход от аналитических моделей, рассматривающих природную систему в целом, или изучающих определенный аспект, например, рост дерева или древостоя, к компьютерным моделям, которые имитировали на компьютере реальные процессы, например, перехват солнечной радиации кроной дерева, стал возможен благодаря появлению быстродействующих компьютеров и накоплению в экспериментальной науке знаний о процессах, что привело к созданию процессных моделей. Эти две линии развития: детализация и усложнение структуры и совершенствование описания процессов, протекающих в реальных системах, часто объединяются в одной компьютерной модели и, в зависимости от специфики задачи, могут интерпретироваться как индивидуально-ориентированные или процессные модели. Так, класс индивидуально-ориентированных и агентных моделей, основанных на описании поведения отдельных организмов (индивидуумов), стал широко применяться в экологии [1–7] и экономике [8] для понимания коллективных эффектов, исходя из взаимодействий индивидуальных агентов. В то же время, процессные модели, учитывающие эффекты различных внешних факторов и эндогенных процессов, позволили прогнозировать поведение системы при изменении параметров среды, например, климатических характеристик.

Природные системы настолько сложны, что с помощью одной модели, как правило, не удастся описать поведение реальной системы во всех деталях. Таким образом, возникает необходимость интегрировать несколько моделей, чтобы достичь необходимых функциональных возможностей. Трудность, которая часто возникает при попытке построить модельную систему в виде сети компьютерных моделей, заключается в том, что они не полностью совместимы, так как были разработаны с различными целями, например, имеют различное пространственное разрешение, используют разный временной шаг, период моделирования, и т.д. Таким образом, существует явный пробел в знаниях: как объединить несколько, не обязательно совместимых моделей, и ставится задача заполнить этот пробел путем разработки соответствующей методологии и инструментов.

В данной статье описывается реализация задачи, связанной с интеграцией нескольких существующих моделей в единую структуру на основе протокола обмена данными. В рамках разрабатываемого протокола выходные данные одних моделей будут использоваться в качестве входных данных для других, что позволит проводить комплексную оценку синергий и компромиссов между разными экосистемными функциями (ЭФ) лесов.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ, ЗАДЕЙСТВОВАННЫХ В РАМКАХ ИНТЕГРАЦИИ

В таблице 1 представлена краткая сводная информация по моделям, задействованным в рамках интеграции. Очевидно, что ни одна из отдельно взятых моделей не в состоянии обеспечить оценку способности лесных экосистем к реализации всего комплекса ЭФ с учетом компромиссов и синергии между ними. Например, модель FORRUS-S оценивает обеспеченность древесной и недревесной продукцией, рекреационный потенциал лесов при разных сценариях лесопользования, и экономическую доходность от заготовки и реализации древесных и недревесных ресурсов леса, но не позволяет оценивать аккумуляцию углерода в органическом веществе почвы, влияние почвенных условий (влажности и обеспеченности элементами минерального питания) на продуктивность древостоев, а также способность лесных экосистем к поддержанию биологического разнообразия. Следовательно, необходимо

дополнить «ядро» системы моделей – FORRUS-S – моделями, которые будут обеспечивать моделирование экосистемных процессов, не учитываемых в FORRUS-S.

Таблица 1. Характеристика моделей, задействованных в интеграции

Модель	Временной шаг моделирования	Входные данные	Выходные переменные (в терминах ЭФ)
FORRUS-S [9–12]	5 лет	Таксационные описания, план лесных насаждений, пространственная структура выделов (ГИС), сценарии – способы проведения л/х мероприятий, ограничения на л/х деятельность, схема дорожной сети, лесопереработка, рынок потребления	Обеспечение древесиной, недревесной продукцией (грибы, ягоды, мед), социальные услуги (охота и рекреационный потенциал), экономическая оценка
Romul_Hum [13–15])	1 месяц	Начальные значения пулов ОрВП, почвенно-гидрологические константы, количество растительного опада и содержание в нем азота, температура и влажность подстилки и минеральной почвы	Аккумуляция в почве углерода и азота, эмиссия диоксида углерода, доступный азот, управление эдафическим потенциалом местообитания
SCLISS [16–18]	1 месяц	Метеорологические данные, гидрофизические свойства почвы, состав древостоя	Тепло- и влагообеспеченность почвы
BioCalc [19–21]	1 год	Таксационные описания (доминант древостоя, тип лесорастительных условий, тип леса), геоботанические описания основных типов леса, выходные данные моделирования экосистемной динамики (состав древостоя, запас валежа, освещенность на уровне почвы и др.)	Сохранение биологического разнообразия растительности напочвенного покрова

2. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ НА ОСНОВЕ ПРОТОКОЛА ОБМЕНА ДАННЫМИ МЕЖДУ НЕЗАВИСИМЫМИ ПРИЛОЖЕНИЯМИ

Современные программные комплексы строятся на основе модульной архитектуры, которая имеет ряд преимуществ перед обычной «монолитной»: (1) разработка и модификация отдельного компонента – намного более легкая задача, чем разработка целой системы моделей; (2) модульная структура делает возможной постепенную разработку программ; (3) разные компоненты могут быть написаны разными группами исследователей, работающими независимо друг от друга, и необходимо лишь придерживаться определенных, заранее установленных стандартов, регламентирующих реализацию взаимодействия модулей для обеспечения их совместимости, а внутренняя реализация модуля (алгоритма работы подмодели) может быть произвольной; (4) разные компоненты могут быть написаны на разных языках программирования; (5) возможно повторное использование подмодели в составе других моделей; (6) компоненты могут легко заменяться на другие без необходимости перекомпиляции всей модели, что позволяет проводить сравнительное тестирование разных моделей одного и того же процесса; (7) возможно создание систем, изменяющих свою функциональность в зависимости от предъявляемых к ним требований; (8) модульная архитектура облегчает распараллеливание вычислений, что может быть реализовано как при одновременном выполнении нескольких подмоделей, так и запуске нескольких копий одной подмодели [22].

Однако при реализации модульной архитектуры могут возникнуть определенные трудности: (1) необходимо дополнительно разрабатывать общую структуру,

объединяющую разные модули, и стандартизировать каждый модуль; (2) разные подмодели могут функционировать на разных пространственных масштабах и с разным временным шагом (например, модель динамики органического вещества почвы может иметь месячный шаг, а модель древостоя – годовой или пятилетний), поэтому необходимо обеспечить синхронизацию между модулями; (3) приложения с модульной архитектурой демонстрируют более низкую производительность, поскольку дополнительные вычислительные ресурсы тратятся на обмен данными между компонентами системы; (4) как правило, для инициализации моделей необходимы начальные данные, которые считываются из входных файлов, соответственно, необходим универсальный и легко масштабируемый формат входных файлов.

Предлагаемым нами программно-техническим решением для интеграции моделей является разработка интерфейса обмена данными (ИОД) между разными моделями в форме протоколов передачи данных между двумя или несколькими моделями, которые могут быть объединены в сеть моделей или иерархическую систему моделей для оценки синергии и компромиссов между ЭФ лесов.

Если бы все модели были построены единообразно, и все программное обеспечение и оборудование функционировало одинаково, был бы необходим лишь один протокол для обеспечения взаимодействия между моделями, который мог бы обеспечить все потребности передачи данных. В реальности, число комбинаций различных подмоделей и программного обеспечения может быть велико. Как следствие, возможность их надежной интеграции зависит от того, насколько хорошо разработаны соответствующие протоколы.

Таким образом, протоколы, как новый инструмент связи между различными моделями, позволят интегрировать широкий спектр компьютерных моделей из различных предметных областей: экологической, социальной, экономической, для того, чтобы избежать прямых изменений в коде программ, и использовать возможности имеющихся моделей, чтобы изучать поведение интегрированной системы моделей для различных пространственных масштабов, экосистемных функций и услуг. Протоколы должны обеспечивать взаимодействие между моделями, написанными на разных языках программирования под разные платформы, а также имеющими разную пространственную дискретность и шаг по времени (таблица 1). Протоколы реализованы в форме обменных файлов специального формата, хранящих выходные параметры, служащие входными данными для других моделей. Для обеспечения синхронизации моделей каждая из них дополнена программным модулем, реализующим чтение и запись обменных файлов и преобразования, связанные с синхронизацией пространственного масштаба и шага по времени для разных моделей, и конверсией единиц измерения. Кроме того, специальный программный модуль обеспечивает согласованный запуск всех моделей с учетом очередности их исполнения и согласования пространственного масштаба и шага по времени, а также корректное сохранение всех обменных файлов.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕГРАЦИИ МОДЕЛЕЙ

Для функционирования модели динамики органического вещества почвы Romul_Num необходимы данные о температуре и влажности подстилки и минеральной почвы. Для получения таких данных модель была интегрирована со статистическим генератором почвенного климата SCLISS, который позволяет оценивать динамику данных показателей на основе стандартных метеорологических данных. Полученный блок моделей был интегрирован с динамической моделью древостоя FORRUS-S, которая передает в модель Romul_Num данные о количестве растительного опада и данные о составе древесного яруса – в модель SCLISS. Модель SCLISS использует данные о видовом составе и полноте древостоя для конверсии метеорологических

данных в показатели почвенного климата, влияющие, в свою очередь, на коэффициенты скорости разложения растительного опада в модели Romul_Hum, что позволяет динамически оценивать влияние изменений в структуре древесной растительности (как вследствие естественного развития древостоев, так и вследствие лесохозяйственной деятельности) на условия под пологом. Помимо данных об аккумуляции углерода в почвенных горизонтах и эмиссии углекислого газа, модель Romul_Hum позволяет рассчитать запасы углерода и азота в пулах органического вещества почвы, включая доступный для растений минеральный азот. Это основной механизм обратной связи между характеристиками почвы и продуктивностью древостоев, регулируемой через изменения класса трофности местообитания для модели FORRUS-S. Таксационные характеристики древостоев (видовой состав, запас валежа), освещенность на уровне почвы и характеристики трофности местообитания (запасы азота и углерода в почвенных пулах органического вещества, количество азота в доступных для растений формах) служат входными данными для модели BioCalc, которая на их основе оценивает биологическое разнообразие – соотношение видов разных эколого-ценотических групп (ЭЦГ) в напочвенном покрове и ранг видового разнообразия растительности.

Интеграция SCLISS и Romul_Hum предполагает реализацию обмена данными между этими моделями. Модель, которая передает данные, называется источник, а модель, получающая данные – приемник. В связи с тем, что данные переносятся в обе стороны, интеграция носит двусторонний характер.

Интеграция выполняется в 5 этапов: (1) определение, для каких данных каждая из интегрируемых моделей является источником, а для каких – приемником; (2) сопоставление объектов (типов данных и структур, в которых они хранятся) между источником и приемником; (3) выбор протокола и последовательности интеграции моделей; (4) реализация программной интеграции моделей; (5) проведение интеграционного тестирования моделей Romul_Hum и SCLISS.

При анализе входных и выходных параметров, а также алгоритмов работы моделей Romul_Hum и SCLISS были определены обменные параметры в каждом из направлений. Данные, передаваемые из SCLISS в Romul_Hum: (1) температура органогенных горизонтов почвы ($^{\circ}\text{C}$); (2) температура органо-минеральных горизонтов почвы на глубине 20 см ($^{\circ}\text{C}$); (3) объемная влажность органогенных горизонтов почвы (%); (4) объемная влажность органо-минеральных горизонтов почвы в слое до 1 м (%); (5) влажность завядания для органогенных горизонтов почвы (%); (6) наименьшая полевая влагоемкость для органогенных горизонтов почвы (%); (7) полная влагоемкость для органогенных горизонтов почвы (%).

Данные, передаваемые из Romul_Hum в SCLISS: (1) запас углерода в подстилке ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$). Входные данные, являющиеся общими для обеих моделей: (1) влажность завядания для органо-минеральных горизонтов почвы (%); (2) наименьшая полевая влагоемкость для органо-минеральных горизонтов почвы (%); (3) полная влагоемкость для органо-минеральных горизонтов почвы (%).

Процедура интеграции программных реализаций моделей Romul_Hum и SCLISS также предполагает проведение интеграционного тестирования взаимодействия этих моделей, выполняющих вычисления вместе. Тестирование заключалось в сравнении результата обработки интегрированными моделями набора входных данных с последовательной пошаговой обработкой этих же данных каждой моделью отдельно в течение 1200 шагов (100 лет). Идентичность результатов, полученных разными способами, служит критерием корректности интеграции. Также тестирование позволит оценить производительность метода интеграции.

Основная идея взаимодействия модели FORRUS-S с почвенной моделью Romul_Hum (объединенной с моделью почвенного климата SCLISS) заключается в том,

чтобы воспроизвести в рамках лесоводственной модели элементы естественной динамики лесных экосистем с имитацией не только роста лесной растительности, но и динамики почвы с обратной связью от почвы к древесной растительности при изменении почвенных условий. Нами разработан следующий алгоритм взаимодействия между моделями.

Шаг 1. На подготовительном шаге вычисляются функции соответствия классов бонитета пулам азота почвы [17]. Расчет производится только по градиенту почвенного богатства по классификации П.С. Погребняка, отдельно для каждого класса влажности, т.к. модель Romul_Num работает с набором сценариев влажности и температуры почвы. Значения пулов принимаются за срединные типичные величины для соответствующего типа лесорастительных условий отдельно для основных лесобразующих пород. По этим значениям вычисляются регрессионные уравнения зависимости класса бонитета от отношения C:N органического вещества почвы отдельно по каждому классу увлажнения в ряду от А до D для расчёта классов бонитета, когда величина пулов отличается от срединных значений. По этим функциям в конце каждого пятилетнего шага FORRUS-S вычисляются классы бонитета для следующего пятилетнего шага. Также на подготовительном шаге проводится т.н. «spin-up» калибровка с использованием данных по опадом чистых спелых древостоев целевого состава и возраста, рассчитанных с помощью FORRUS-S, для коррекции параметров опадов. Данный подход предусматривает запуск Romul_Num с постоянными параметрами опадов и почвенного климата до достижения равновесных значений пулов органического вещества и азота в почве. Далее оценивается соответствие полученных равновесных величин известным опубликованным экспериментальным данным для района работ, и в случае расхождения более чем на 15 % проводится корректировка исходных данных по опадом с повторными запусками почвенной модели. Изменению подлежат только недостаточно экспериментально оцененные параметры опадов (масса тонких корней; концентрация азота в опаде) или процессы в модели Romul_Num (коэффициенты трансформации органического вещества в подстилке, k_4 , и перехода материала из органического в минеральный горизонт, k_9) [13]. Подобная калибровка проводится отдельно для каждого экспериментального объекта.

Шаг 2. На шаге инициализации происходит оценка исходных пулов органического вещества почвы и азота для модели Romul_Num по откорректированной после «spin-up» калибровки таблице этих параметров, ранжированных по типам местообитания П.С. Погребняка [17], так как данные почвенной съемки с физико-химическими параметрами почв для лесных земель, как правило, отсутствуют (и также с коррекцией величин пулов, если есть в наличии экспериментальные данные).

Шаг 3. Используя начальные данные о трофности местообитаний из шага 2, модель FORRUS-S запускается на один пятилетний шаг с исходными параметрами древостоя на нулевом шаге (из таксационных данных). По параметрам древостоя рассчитывается его биомасса в конце шага FORRUS-S: объем древесины пересчитывается с помощью конверсионных коэффициентов в биомассу листвы/хвои, ветвей, ствола, скелетных и тонких корней. На основе массы этих фракций производится расчет количества опада разных фракций. Из модели FORRUS-S экспортируются параметры древостоя (видовой состав, сомкнутость, масса живой листвы), соответствующие начальному состоянию и состоянию на конец пятилетнего шага. Для массы опадов считаются их суммы за пятилетний период.

Шаг 4. Модели SCLISS и Romul_Num запускаются на 60-месячных шагов (что соответствует пятилетнему шагу модели FORRUS-S). В качестве начальных данных используются оценки запасов углерода и азота в почвенных пулах, рассчитанные согласно шагу 2. Таксационные характеристики древостоев, необходимые для работы

модели SCLISS, для каждого года внутри пятилетнего цикла рассчитываются с помощью интерполяции между начальными и конечными значениями в пятилетнем цикле. При переходе к месячному шагу состав и сомкнутость древостоя считаются неизменными на протяжении года, а масса листвы листопадных пород принимается равной нулю за пределами вегетационного периода. Пятилетняя сумма масс опадов считается равномерно распределенной между годами внутри цикла. При переходе к месячному шагу распределение долей опадов по месяцам рассчитывается с помощью эмпирических функций. Данные по запасам углерода и азота в почвенных пулах экспортируются в файл для передачи в модель FORRUS-S.

Шаг 5. Модель FORRUS-S производит расчет классов бонитетов по пулам азота почвы на конец пятилетнего цикла с помощью функции из шага 1 с соответствующей корректировкой роста древостоев. Далее алгоритм возвращается к шагу 1.

В силу различий в пространственном масштабе между моделью FORRUS-S и блоком моделей Romul_Hum–SCLISS, используется следующий подход к синхронизации моделей: FORRUS-S имитирует динамику всей модельной территории (обычно – участковое лесничество или арендованный лесной участок) одновременно, но с сохранением внутренней пространственной детализации, и экспортирует обменные данные по выделу; Romul_Hum и SCLISS последовательно выполняются для каждого из выделов на модельной территории, после чего агрегируют результаты моделирования в общий файл с сохранением детализации на уровне отдельных выделов.

Данное программно-техническое решение позволяет учесть обратную связь от почвы к древостою с влиянием изменения трофности почвы на продуктивность древесных растений, что открывает возможности для более точного отражения изменения продуктивности леса в ходе экогенетических и демутиационных сукцессий. Следует отметить, что во всех существующих лесных моделях с вычислением прироста древесины по кривым и таблицам хода роста эта обратная связь отсутствует.

Обменный файл, содержащий данные, передаваемые из FORRUS-S в блок Romul_Hum–SCLISS, представляет собой файл в формате CSV (набор значений, разделенных запятыми), в котором поля (столбцы) соответствуют экспортируемым параметрам, а записи (строки) – отдельным выделам.

Файл содержит следующие данные: (1) уникальный идентификатор выдела, который позволяет однозначно связать передаваемые из FORRUS-S данные по составу древостоя и количеству опада с хранимыми в модели Romul_Hum данными по почвенным пулам для соответствующего выдела; (2) общая сомкнутость полога (все ярусы), доли от единицы; (3) масса хвои/листвы по породам, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$; (4) доля от общей сомкнутости полога, приходящаяся на каждую породу (в долях от 1); (5) масса опада (ствол, ветви, скелетные корни, тонкие корни, хвоя/листва по древесным породам), $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$. В свою очередь, Romul_Hum передает в FORRUS-S сходным образом устроенный обменный файл, содержащий информацию о запасах углерода и азота в почвенных пулах для каждого выдела.

Интеграция комплекса моделей FORRUS-S–Romul_Hum–SCLISS и BioCalc также осуществляется с помощью обменного файла в формате CSV, в котором поля представляют собой экспортируемые параметры, а строки – лесотаксационные выделы.

Файл содержит следующие обязательные поля: (1) уникальный идентификатор выдела; (2) шаг моделирования; (3) доминирующий вид в древостое; (4) тип лесорастительных условий; (5) удельная масса валежа, определенная по методике Стороженко [23], $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$; (6) освещенность на уровне почвы, % от освещенности над пологом, (7) значения запаса углерода, азота и отношения C/N в почвенных пулах для каждого выдела.

Выходные данные модели BioCalc содержат информацию о доминирующей ЭЦГ видов растений, ЭЦТЛ и ранге видового разнообразия отдельно для каждого шага моделирования и каждого из выделов. Оценка биоразнообразия рассчитывается для каждого лесотаксационного выдела с шагом по времени, равном шагу модели FORRUS – пять лет. Схема интеграции моделей представлена на рисунке 1.

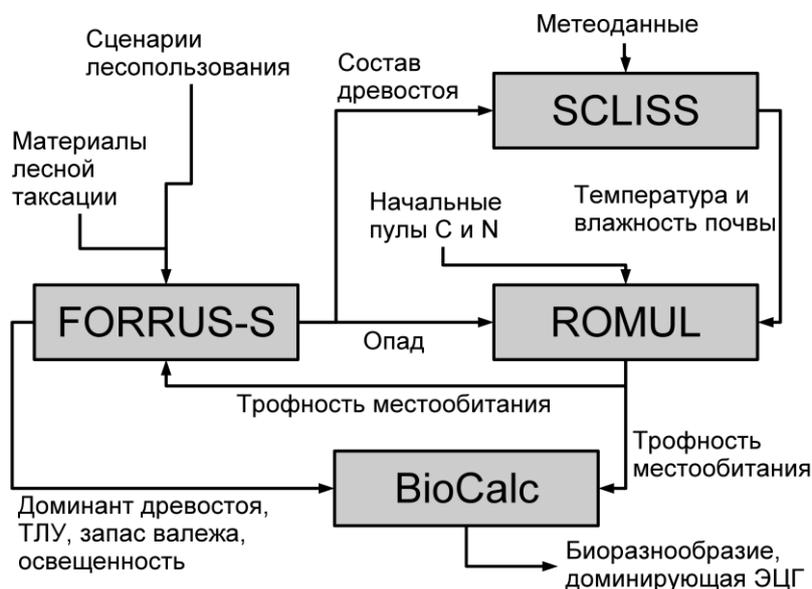


Рис. 1. Схема интеграции моделей FORRUS-S, Romul_Hum, SCLISS и BioCalc.

ОЦЕНКА С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ОСНОВНЫХ ЭКОСИСТЕМНЫХ ФУНКЦИЙ

Для демонстрации функционирования комплекса экологических моделей была выбрана территория Данковского участкового лесничества (Московская область, городской округ Серпухов), расположенного в зоне смешанных хвойно-широколиственных лесов. В лесном покрове преобладают пионерные березняки, осинники и сосняки. Преобладают средневозрастные насаждения (53 %, средний возраст насаждений – 53 года), спелые и перестойные занимают 18 %; на долю приспевающих и молодняков приходится 17 % и 12 %, соответственно. По типам лесорастительных условий (ТЛУ) преобладают свежие и влажные субори и сложные субори. Слабоподзолистые почвы сформированы на бедных песках. Имитационный сценарий предполагал развитие древостоев без внешних воздействий.

Согласно результатам моделирования, пионерные мелколиственные породы еще некоторое время увеличивают свой запас, однако через 25–30 лет начинается процесс постепенного распада березовых и осиновых насаждений. Их общий запас уменьшается к концу 50-летнего периода с 58 до 46 %, и, вероятнее всего, эта тенденция уменьшения их присутствия в насаждениях будет прослеживаться и дальше. Сосняки на начальном этапе моделирования представлены в основном средневозрастными и приспевающими насаждениями. Поэтому в условиях естественного развития эти насаждения продолжают активно развиваться и увеличивают свой запас практически в два раза. Однако их доля в общем запасе увеличивается всего на два процента: с 20 до 22 %. Две наиболее теневыносливые породы – ель и липа – закономерно увеличивают свое присутствие в насаждениях. И хотя на конец 50-летнего периода их доля в насаждении составляет около 27 %, однако они значительно быстрее других пород увеличивают свои запасы: ель – в 2.8 раза, а липа – в 2.6 раза. Вероятнее всего, при отсутствии

внешних воздействий эта тенденция сохранится. Благодаря своей теневыносливости именно эти породы способны замещать более светолюбивые. В более длительной перспективе следует ожидать формирование елово-липовых насаждений. Таким образом, динамика породного состава при естественном развитии насаждений согласуется с современными представлениями о закономерностях ненарушенного развития лесных экосистем и демонстрирует тенденцию к переходу от сформировавшихся после рубок пионерных сообществ к позднесукцессионным.

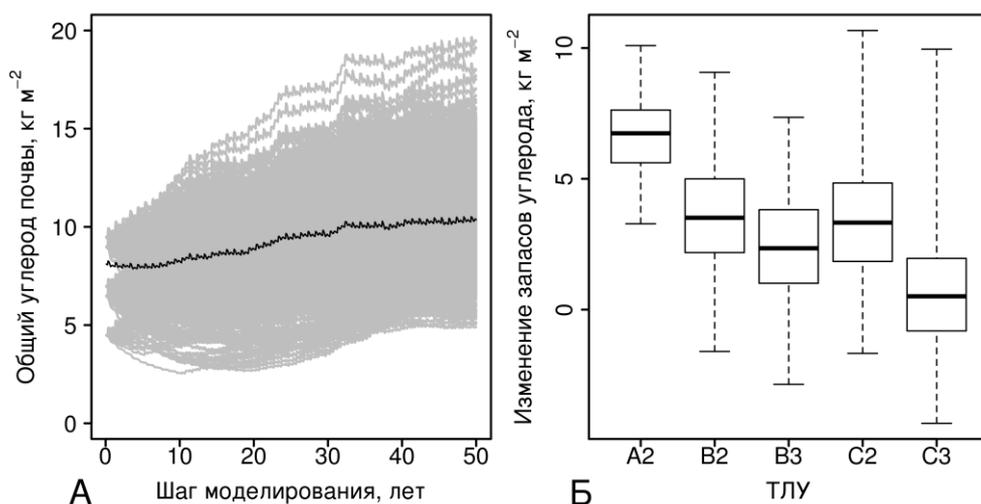


Рис. 2. (А) Динамика общего запаса углерода в почве: серые линии – динамика для отдельных выделов, черная линия – средний запас для модельной территории. (Б) Абсолютные изменения общего запаса углерода в почве (разность между конечными и начальными значениями) для разных ТЛУ. Показаны медианные значения, 1-й и 3-й квартили, размах.

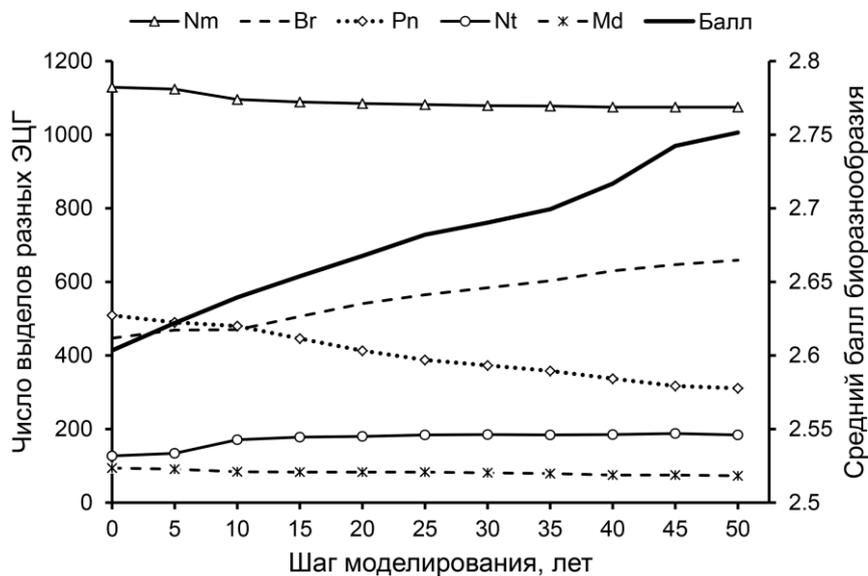


Рис. 3. Динамика доминирующих эколого-ценотических групп и балльной оценки разнообразия напочвенного покрова.

Обобщенные данные по динамике углерода органического вещества почв (ОрВП) на 2302 выделах с разным составом, возрастом и полнотой древостоя, типом почв и лесорастительных условий показывают тренд к увеличению пулов углерода органического вещества почв (рис. 2,А), который коррелирует с динамикой породного состава при естественном развитии. Варьирование динамических кривых в разных

выделах определяется перечисленными выше условиями, выражающимися в различиях в количестве и качестве опада, а также микроклиматических условий под пологом. Секвестирование ОрВП при естественном развитии заметно различается в разных ТЛУ (рис. 2,Б): оно наиболее выражено на бедных почвах (А2) с возрастанием пулов углерода почти вдвое. В оптимальных и влажных ТЛУ (С2, С3) пул углерода ОрВП увеличивался на 10–40 %. Также отмечено сокращение пулов углерода в начале прогонов, что соответствует вырубкам и молоднякам, в которых поступление опада не компенсировало потери углерода при разложении ОрВП.

Динамика разнообразия напочвенного покрова также показывает его постепенное увеличение при естественном развитии (рис. 3). Доминирующие мезотрофные ТЛУ С2 и С3 (61 % всей площади) определяют преобладание видов неморальной ЭЦГ, однако число выделов с господством этой группы постепенно снижается за счет увеличения участия бореальных и нитрофильных видов. Последнее происходит в результате возрастания доли ели в древостое (рис. 4) и неизбежного в ходе естественного развития древостоев увеличения запаса валежа, приводящих к увеличению пула ОрВП.

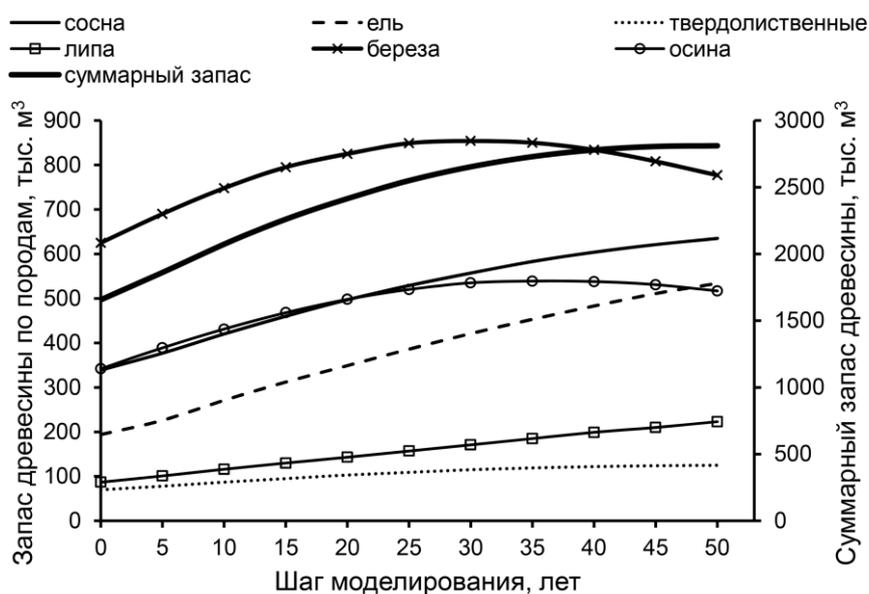


Рис. 4. Динамика породного состава насаждений на территории Данковского участкового лесничества (сценарий развития без нарушений, 50 лет).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемое программно-техническое решение представляет собой прототип программного модуля, позволяющего функционально интегрировать четыре математических модели различных компонентов экосистем и процессов круговорота элементов в единую систему. Данная система позволит проводить оценку и прогноз способности лесных экосистем к реализации широкого спектра экосистемных функций с учетом компромиссов и синергии между ними, принимая во внимание влияние на экосистемные процессы изменяющихся или варьирующих почвенных и гидрологических условий, нарушающих воздействий и хозяйственной деятельности человека, расширяя, таким образом, возможности ранее применяемых моделей [24, 25]. Использование файлового протокола обмена данными повышает гибкость и универсальность системы, позволяя объединить модели, написанные с помощью разных языков программирования, с учетом необходимости согласования пространственного масштаба и шага по времени. В качестве иллюстрации

работоспособности системы был проведен вычислительный эксперимент, в результате которого была показана изменчивость почвенных условий и их взаимосвязь с породным составом древостоев и динамикой живого напочвенного покрова лесных экосистем, что, наряду со статическими свойствами почв (гранулометрический и минералогический состав), определяет актуальную продуктивность местообитаний.

Работа П.Я. Грабарника, С.И. Чумаченко, В.Н. Шанина, М.В. Бобровского и П.В. Фролова осуществлялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61618X0101) в рамках проекта FP7 ERA-Net Sumforest-POLYFORES.

ЛИТЕРАТУРА

1. Речан С.П., Малышева Т.В., Абатуров А.В., Меланхолин П.Н. *Леса северного Подмосковья*. М.: Наука, 1993. 316 с.
2. DeAngelis D.L., Gross L.J. *Individual based models and approaches in ecology: concepts and models*. New York: Routledge, 1992. 552 p.
3. DeAngelis D.L., Mooij W.M. Individual-based modeling of ecological and evolutionary processes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2005. V. 36. P. 147–168.
4. Grimm V. Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? *Ecological Modelling*. 1999. V. 115. No. 2–3. P. 129–148.
5. Huse G., Giske J., Salvanes A.G.V. Individual-based models. In: *Handbook of Fish Biology and Fisheries. Vol. 2: Fisheries*. Malden: Blackwell, 2002. P. 228–248.
6. Peng C., Liu J., Dang Q., Apps M., Jiang H. TRIPLEX: a generic hybrid model for predicting forest growth and carbon and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling*. 2002. V. 153. No. 1. P. 109–130.
7. Shugart H.H., Smith T.M., Post W.M. The potential for application of individual-based simulation models for assessing the effects of global change. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1992. V. 23. P. 15–38.
8. Gilbert N., Troitzsch K.G. *Simulation for the Social Scientist*. Maidenhead: McGraw-Hill Education, 2005. 295 p.
9. Чумаченко С.И. Базовая модель динамики многовидового разновозрастного лесного ценоза. *Научные труды Московского государственного университета леса*. 1993. № 248. С. 147–180.
10. Чумаченко С.И. *Имитационное моделирование многовидовых разновозрастных лесных насаждений*: дисс. ... докт. биол. наук (спец. 03.00.16). М.: МГУЛ, 2006. 287 с.
11. 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. *Научные труды Московского государственного университета леса*. 2001. № 314. С. 128–146.
12. Chumachenko S.I., Korotkov V.N., Palenova M.M., Politov D.V. Simulation modeling of long-term stand dynamics at different scenarios of forest management for coniferous-broad-leaved forests. *Ecological Modelling*. 2003. V. 170. No. 2–3. P. 345–362.
13. Komarov A., Chertov O., Bykhovets S., Shaw C., Nadporozhskaya M., Frolov P., Shashkov M., Shanin V., Grabarnik P., Pripulina I., Zubkova E. Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing. *Ecological Modelling*. 2017. V. 345. P. 113–124.
14. Chertov O., Komarov A., Shaw C., Bykhovets S., Frolov P., Shanin V., Grabarnik P., Pripulina I., Zubkova E., Shashkov M. Romul_Hum – A model of soil organic matter

- formation coupling with soil biota activity. II. Parameterisation of the soil food web biota activity. *Ecological Modelling*. 2017. V. 345. P. 125–139.
15. Chertov O., Shaw C., Shashkov M., Komarov A., Bykhovets S., Shanin V., Grabarnik P., Frolov P., Kalinina O., Pripulina I., Zubkova E. Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. III. Parameterisation of earthworm activity. *Ecological Modelling*. 2017. V. 345. P. 140–149.
 16. Быховец С.С., Комаров А.С. Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом. *Почвоведение*. 2002. № 4. С. 443–452.
 17. *Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах*. Под ред. В.Н. Кудеярова. М.: Наука, 2007. 380 с.
 18. Быховец С.С., Фролов П.В., Шанин В.Н. Обобщение модели водно-теплового режима лесных почв SCLISS на случай смешанного древостоя. В: *Научные основы устойчивого управления лесами: материалы Всероссийской научной конференции*. М.: ЦЭПЛ РАН, 2018. С. 181–182.
 19. Ханина Л.Г., Комаров А.С., Бобровский М.В., Михайлов А.В., Быховец С.С., Лукьянов А.М. Моделирование динамики разнообразия лесного напочвенного покрова. *Лесоведение*. 2006. № 1. С. 70–80.
 20. Khanina L., Bobrovsky M., Komarov A., Mikhailov A. Modeling dynamics of forest ground vegetation diversity under different forest management regimes. *Forest Ecology and Management*. 2007. V. 248. No. 1–2. P. 80–94.
 21. Khanina L.G., Bobrovsky M.V., Komarov A.S., Shanin V.N., Bykhovets S.S. Model predictions of effects of different climate change scenarios on species diversity with or without management intervention, repeated thinning, for a site in Central European Russia. In: *Nitrogen Deposition, Critical Loads and Biodiversity*. Dordrecht: Springer, 2014. P. 173–182.
 22. Антонов А.С. *Введение в параллельные вычисления (методическое пособие)*. М.: Изд-во МГУ, 2002. 69 с.
 23. Стороженко В.Г. Датировка разложения крупных древесных остатков в лесах различных природных зон. *Лесоведение*. 2001. № 1. С. 49–53.
 24. Комаров А.С., Чертов О.Г., Быховец С.С., Припутина И.В., Шанин В.Н., Видягина Е.О., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А. Воздействие осиновых плантаций с коротким оборотом рубки на биологический круговорот углерода и азота в лесах бореальной зоны: модельный эксперимент. *Математическая биология и биоинформатика*. 2015. Т. 10. № 2. С. 398–415. doi: [10.17537/2015.10.398](https://doi.org/10.17537/2015.10.398).
 25. Припутина И.В., Фролова Г.Г., Быховец С.С., Шанин В.Н., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А. Моделирование продуктивности лесных плантаций при разных схемах пространственного размещения деревьев. *Математическая биология и биоинформатика*. 2016. Т. 11. № 2. С. 245–262. doi: [10.17537/2016.11.245](https://doi.org/10.17537/2016.11.245).

Рукопись поступила в редакцию 05.08.2019, переработанный вариант поступил 29.10.2019.
Дата опубликования 05.11.2019.