

УДК 581.526

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВЕДЕНИЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА БАЛАНС БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ: МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД

© 2009 В.Н. Шанин¹, А.В. Михайлов¹, А.С. Комаров²

¹УРАН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, аспирант
Российская Федерация, г. Пущино; e-mail: shaninvn@gmail.com; alexey.mikh@gmail.com

²УРАН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино;
e-mail: as_komarov@rambler.ru

Индивидуально-ориентированная система моделей биологического круговорота углерода и азота в лесных экосистемах EFIMOD была использована для имитации динамики лесной растительности в региональном масштабе. В качестве входных данных использовались материалы лесоустройства; был разработан алгоритм генерализации таксационных данных. Имитационный эксперимент проводился при нескольких лесохозяйственных и климатических сценариях. Показано влияние режима лесопользования и значительных климатических изменений на баланс биогенных элементов в системе «лес-почва».

Ключевые слова: имитационное моделирование, лесное хозяйство, баланс углерода.

ВВЕДЕНИЕ

В лесах – одном из основных типов растительного покрова Земли – сконцентрировано 92% углерода, содержащегося в наземной растительности. Еще большая масса углерода законсервирована в мертвом органическом веществе лесов (детрите), а также в гумусе почв и торфяных отложениях лесных болот (Уткин и др., 2001). Поэтому прогноз баланса углерода в лесных экосистемах является одной из важнейших задач в экологическом моделировании, которой посвящено большое количество работ. В качестве примеров можно привести работу Д.Г.Замолодчикова с соавторами (2008) по Вологодской области с применением модели углеродного бюджета CBM-CFS и прогноз баланса углерода для одного из лесничеств Костромской области с помощью модели EFISCEN (Verkerk et al., 2006). Данная работа посвящена опыту применения индивидуально-ориентированной имитационной модели, параметризованной на уровне таксационного лесного выдела, для прогноза динамики углерода в лесных экосистемах на уровне лесничества с сохранением высокого уровня пространственной детализации, что, зачастую, недостижимо при использовании более генерализованных моделей регионального уровня.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовалась система моделей биологического круговорота углерода и азота в лесных экосистемах EFIMOD (Komarov et al., 2003; Моделирование динамики..., 2007), которая

служит для анализа динамики почвы и древостоя в лесных экосистемах бореальной и широколиственной зон. Система моделей является индивидуально-ориентированной; имитируемый древостой располагается на квадратной решетке, размеры клеток решетки выбраны таким образом, что в одной клетке не может находиться более одного дерева. Для каждого дерева рассчитывается биомасса ствола, ветвей, листвы/хвои, скелетных и тонких корней. Каждое дерево взаимодействует с соседними, предусмотрены два аспекта взаимодействия: затенение и конкуренция за доступный почвенный азот. Система моделей состоит из четырех основных подмоделей: модели прироста биомассы отдельного дерева, пространственной модели древостоя, модели динамики органического вещества почвы ROMUL (Chertov et al., 2001) и статистического генератора климата, который имитирует изменение климатических показателей (температура, влажность почвы и др.).

Модель динамики органического вещества в почве включает в себя описание следующих пулов углерода и азота: органическое вещество (и соответствующий азот) лесной подстилки, стабильный (разлагающийся за несколько сотен лет) гумус минеральных горизонтов и лабильный (происходящий из корневого опада и разлагающийся за несколько лет) гумус минеральных горизонтов. Входными величинами являются опады древесных компартментов (сухостой и валеж рассматриваются как фракции опада), выходными – (кроме упомянутых пулов) эмиссия CO₂ из почвы и количество азота, доступного для питания растений.

Так как система моделей EFIMOD является индивидуально-ориентированной, она, в первую очередь, предназначена для оценки динамики лесных экосистем на локальном уровне, т.е. процесс моделирования происходит для таксационного выдела, который может иметь и относительно небольшие размеры. Однако при прогнозировании развития лесных экосистем нередко возникает задача моделирования динамики леса на больших территориях (например, лесничества), состоящего из большого количества выделов. Такой пространственно-детализованный подход позволяет, с одной стороны, оценить динамику территории в целом и выявить некие общие закономерности, и, с другой стороны, сохранить высокий уровень детализации, при котором можно анализировать динамику каждого конкретного участка (выдела), что делает возможным сравнительный анализ, а также позволяет использовать результаты моделирования при построении геоинформационных систем и пространственном анализе.

Для работы модели необходима такая информация, как видовой состав древостоя на участке, возраст, средняя высота ствола и диаметр на уровне груди для каждого вида, число деревьев на гектар, характеристики пулов органического вещества и азота почвы. Большая часть этой информации имеется в лесоустроительных базах данных. Некоторые отсутствующие параметры могут быть легко вычислены. Например, высота, диаметр и число деревьев на один гектар указываются только для доминирующих видов; для остальных они были рассчитаны по региональным таблицам хода роста, исходя из запаса конкретного вида и класса бонитета насаждения. Отсутствующие характеристики пулов органического вещества почвы оценивались, исходя из двух имеющихся параметров: типа лесорастительных условий по Воробьеву-Погребняку и доминанта древостоя (глава 5.5 кн. Моделирование динамики..., 2007). Для реализации различных сценариев лесопользования был создан специальный конструктор, позволяющий задавать все возможные типы и параметры лесохозяйственных воздействий: 1) продолжительность периода моделирования; 2) целевые породы в зависимости от типа лесорастительных условий; 3) систему посадок и рубок; 4) возраст рубки для каждого вида; 5) порядок рубки для каждого вида.

Однако моделирование на основе исходных наборов таксационных данных требует больших вычислительных ресурсов, а объемы полученных результатов чрезвычайно велики. Поэтому был разработан алгоритм генерализации данных лесоустройства. Согласно этому алгоритму, все имеющиеся в базе данных записи группировались

сразу по трем признакам: доминанту древостоя, типу лесорастительных условий по Воробьеву-Погребняку и группе возраста. Далее внутри каждой из групп проводилась генерализация характеристик: суммировались площади всех выделов, входящих в группу; для таких параметров, как класс бонитета насаждения, относительная полнота и запас древостоя, рассчитывалось средневзвешенное значение (мерой веса выступала площадь выдела; средневзвешенное значение класса бонитета затем округлялось до ближайшего целого). Также внутри каждой из групп проводилась генерализация параметров древостоя – рассчитывались средневзвешенные коэффициенты участия для каждой из пород. Таким образом, из исходного набора данных (описания 21637 лесоустроительных выделов) было получено 194 уникальных описания групп выделов, которые далее использовались как исходные данные для модельного эксперимента. Разница между результатами моделирования на основе генерализованных данных и результатами на основе исходных данных не превысила 11% для запаса органического вещества в древостое и 3% для запаса органического вещества в почве.

В качестве экспериментального объекта был выбран Мантуровский лесхоз Костромской области; использовались материалы лесоустройства 1997 года. На начало моделирования на территории преобладали пионерные сообщества – березняки, сосняки и осинники (86%), и только 14% территории занимали ельники. По возрастному составу территория была представлена молодыми и средневозрастными древостоями, только 16% площади были заняты древостоями старше 70 лет.

Для проведения модельного эксперимента были разработаны 3 лесохозяйственных сценария: 1 – без рубок; 2 – с выборочными рубками; 3 – с рубками ухода и последующими сплошными рубками, а также 2 климатических: 1 – при стационарном климате и 2 – в условиях климатических изменений (прогноз с помощью модели HadCM3, сценарий эмиссии A1Fi (Gordon et al., 2000)). Продолжительность периода моделирования составила 309 лет для сценариев со стационарным климатом и 103 года – для сценариев с изменением климата. Стоит отметить, что в сценариях с рубками рубки применялись ко всем выделам на модельной территории, что в реальной практике не встречается.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Имитационный эксперимент проводился на основе генерализованных данных. Результаты моделирования анализировались по следующим

переменным: 1) динамика запасов углерода в древостое, сухостое и валеже, пулах органического вещества почвы; 2) величина эмиссии углекислого газа; 3) чистая первичная продукция экосистемы; 4) видовой состав древостоя и его возрастная структура. Также проводилась оценка потенциального биологического разнообразия, в качестве которого выступали: 1) число одновременно присутствующих на выделе элементов леса и 2) возрастная структура древостоя. Под элементом леса понималась группа деревьев одного вида и одного класса возраста, обладающих схожими дендрометрическими характеристиками (Желдак, Атрохин, 2003).

Запас углерода в древостое при сценарии 1.1 испытывает долгопериодические (40-50 лет) колебания, связанные с изменением видового и возрастного состава, увеличиваясь к концу периода моделирования до 90-100 т/га (при начальном значении этого показателя около 46 т/га). Увеличение связано с развитием начальных древостоев из молодняков, как было указано ранее. При сценарии 2.1 наблюдаются частые небольшие колебания вследствие выборочных рубок, при общей тенденции к увеличению этого показателя до значений порядка 70-75 т/га. При сценарии 3.1 происходит снижение запаса углерода в древостое до 35-45 т/га. Можно отметить, что динамика запасов углерода в древостое более разнообразна, чем динамика запасов углерода в почве; причем данное разнообразие проявляется как при сравнении разных сценариев, так и при анализе временной динамики для одного сценария, где наблюдаются сильные флуктуации во времени этого показателя.

В сценарии 1.1 (без рубок, стационарный климат) запас углерода в почве сначала незначительно увеличивается, затем происходит его стабилизация на уровне порядка 65 т/га (при начальном уровне около 63 т/га). Возрастает доля стабильного гумуса минеральных горизонтов почвы при уменьшении доли лабильного гумуса минеральных горизонтов и лесной подстилки. В сценарии 2.1 (с выборочными рубками, стационарный климат) также происходит стабилизация запаса углерода в почве к концу периода моделирования, но на более высоком уровне – порядка 70 т/га. При этом наблюдаются частые колебания с небольшой амплитудой, вызванные разложением порубочных остатков. Как и в предыдущем сценарии, возрастает доля стабильного гумуса, но падают доли лабильного гумуса и подстилки. В сценарии 3.1 (с рубками ухода и последующей сплошной рубкой, стационарный климат) происходит снижение общего запаса углерода в почве до величин порядка 60 т/га, в основном за счет подстилки. При этом доля лабиль-

ного гумуса остается постоянной, а доля стабильного, как и в предыдущих сценариях, возрастает. Из вышеизложенного видно, что почвенные пулы органического вещества по-разному реагируют на лесохозяйственные сценарии. Стабильный гумус является буферным компонентом почвы и слабо реагирует на антропогенные воздействия, в отличие от лабильного гумуса и подстилки, количество которых может сильно колебаться вследствие поступления порубочных остатков в процессе рубок.

Если сравнивать реакции экосистем на разные климатические сценарии, можно отметить, что в сценариях с изменением климата (1.2, 2.2 и 3.2), которое выражается, в первую очередь, в повышении среднемесячных температур, происходит повышенное (по сравнению со сценариями со стационарным климатом) накопление углерода в фитомассе и меньшее его накопление в пулах органического вещества почвы.

При сценарии 1.1 формируются разновозрастные хвойно-широколиственные древостои, образованные позднесукцессионными видами (в основном елью, дубом и липой); пионерные виды (береза и осина) к концу периода моделирования исчезают практически полностью. Сценарий 2.1 приводит к формированию древостоев сходного состава, но с более высокой долей ели, на которую в данном сценарии направлено ведение лесного хозяйства. Сценарий 3.1 приводит к формированию преимущественно хвойных древостоев, сформированных видами, на которые направлено ведение лесного хозяйства: ели – на богатых почвах и сосны – на бедных. Сравнение со сценариями 1.2, 2.2 и 3.2 показало, что климатические изменения практически не повлияли на динамику видового состава древостоев (лишь в сценарии без рубок наблюдается увеличение доли широколиственных видов, в остальных сценариях влияние климата на видовой состав полностью нивелируется лесохозяйственными мероприятиями). При сценариях 1.1 и 2.1 наблюдается увеличение числа элементов леса и запаса сухостоя и валежа (более значительное в сценарии 1.1), что свидетельствует о возрастании структурного разнообразия растительности; сценарий 3.1 характеризуется постоянным числом элементов леса и небольшим запасом сухостоя и валежа в силу применения сплошных рубок главного пользования. При сценариях 1.1 и 2.1 формируются древостои с полночленными левосторонними возрастными спектрами; при сценарии 3.1 значительно преобладают деревья 1-6-го классов возраста, что также можно объяснить проведением сплошных рубок. Климатические изменения не оказали значительного влияния на видовой состав и возрастную структуру древо-

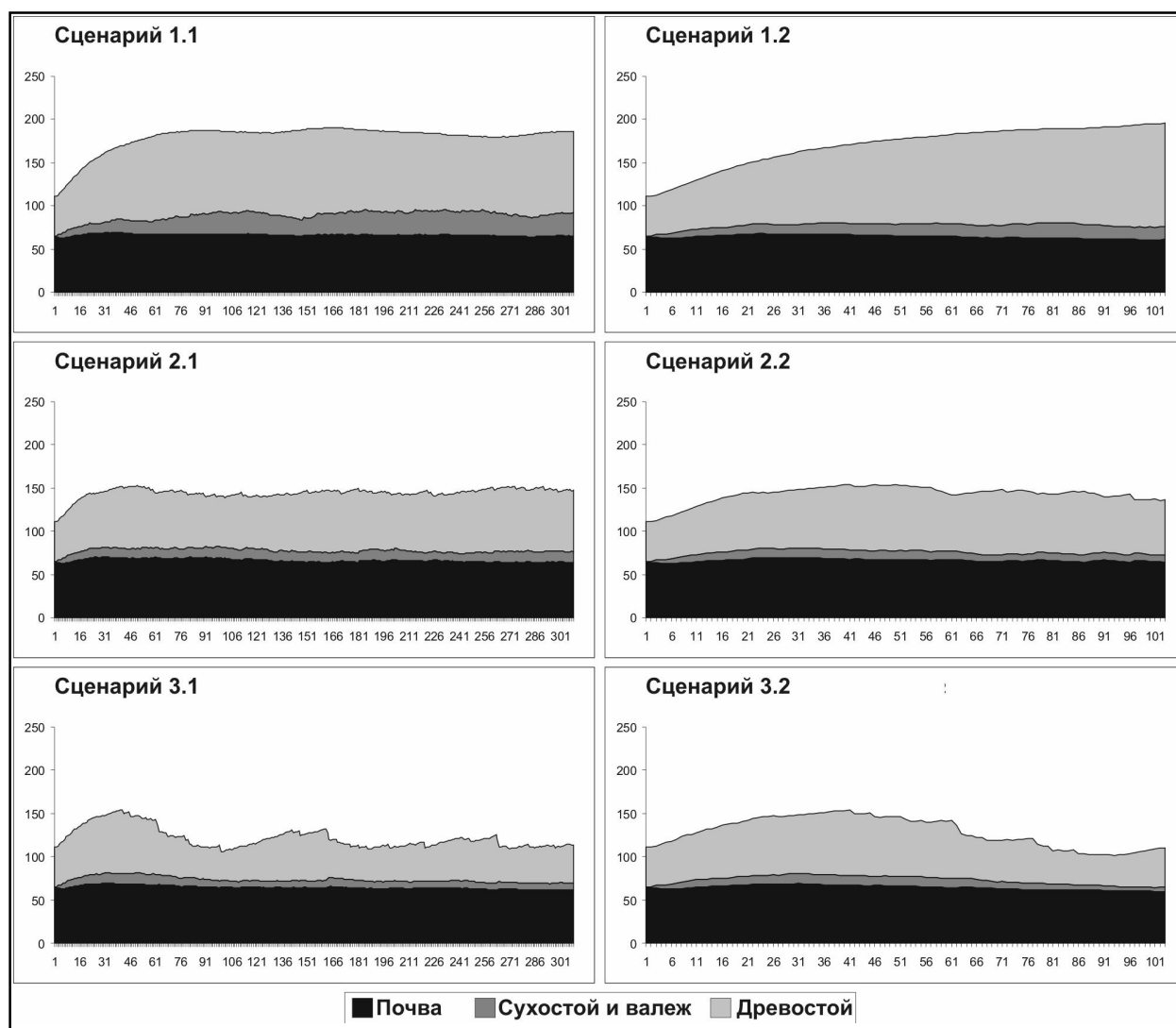


Рис. 1. Динамика запасов углерода в основных депо при различных сценариях лесопользования и при разных климатических сценариях. По оси абсцисс отложен шаг моделирования, по оси ординат - запас углерода (в т/га).

стоев.

Уровень чистой первичной продукции (NPP) может свидетельствовать об интенсивности накопления углерода в экосистеме и, таким образом, является показателем углеродного баланса. При сценариях 1.1 и 2.1 суммы NPP за 103 года практически равны (356 и 347 т/га, соответственно). При сценарии 3.1 значение этого параметра составляет 328 т/га (рис. 2). Практически одинаковые значения NPP для сценариев с рубками и без можно объяснить тем, что при отсутствии рубок происходит старение и, как следствие, начинаются процессы естественного распада древостоев в силу гибели формирующих их деревьев. Сменяющий их подрост до формирования сомкнутого полога характеризуется невысокими абсолютными значениями чистой первичной продукции. В то же время, рубки приводят к изъятию деревьев до того, как начнутся процес-

сы распада древостоев, сокращая, таким образом, продолжительность существования фазы с низкими значениями NPP. Суммарный объем эмиссии углекислого газа снижается от сценария 1.1 к сценарию 3.1. Следует отметить, что уровень эмиссии углекислого газа зависит от количества поступающего на почву опада. Чем меньше органического вещества изымается из системы, тем больше его вовлекается в процессы деструкции. Сравнивая между собой климатические сценарии, можно отметить, что при изменении климата (сценарии 1.2, 2.2 и 3.2) повышается уровень эмиссии углекислого газа вследствие ускорения деструкционных процессов в почве. Как следствие, увеличение количества доступных элементов питания в почве приводит к повышению уровня NPP при сценариях с «глобальным потеплением» (рис. 2).

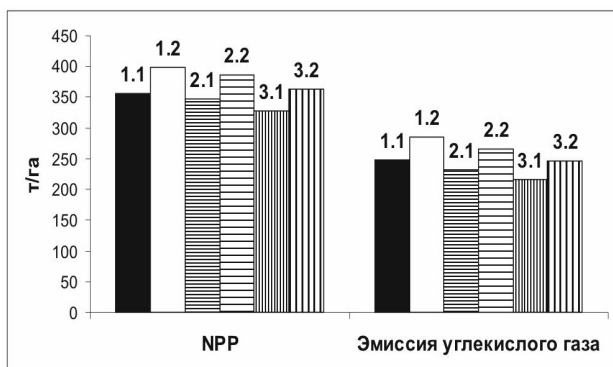


Рис. 2. Чистая первичная продукция экосистемы и эмиссия углекислого газа (сумма за 103 года в пересчете на чистый углерод) при различных сценариях.

Также следует обратить внимание, что количество заготовленной деловой древесины достаточно схоже для обоих сценариев с рубками. Для всей модельной территории за 103-летний период моделирования эта величина составляет: 570,37 млн. м³ для сценария 2.1 и 598,12 млн. м³ для сценария 3.1. Тем не менее, стоит отметить, что при достаточно близких объемах изъятия древесины, эти сценарии приводят к различным запасам углерода в фитомассе и почве, а также к сильно различающимся по видовому составу и возрастной структуре древостоям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была продемонстрирована возможность применения индивидуально-ориентированных моделей лесных экосистем для прогноза динамики лесной растительности на больших территориях с высоким уровнем детализации. Разработанная система позволяет реализовать различные сценарии, имитирующие разные системы ведения лесного хозяйства с возможностью их гибкой подстройки, позволяющей учесть специфику конкретного лесотаксационного выдела. Была разработана методика подготовки входных данных на основе материалов лесоустройства, включающая процедуры восстановления недостающей информации. Пространственно-временной анализ результатов модельного эксперимента при применении разных сценариев лесопользования показал, что наибольшее накопление углерода в лесной экосистеме происходит при сценарии без рубок. Анализ результатов также показал, что повышение среднегодовых температур влияет на перераспределение запасов углерода в органической форме между депо фитомассы и почвы в пользу первого. Показано, что лесохозяйственная практика оказывает решаю-

щее влияние на видовой состав, возрастную структуру и круговорот биогенных элементов в лесных экосистемах, практически полностью нивелируя эффект от климатических изменений. Также был разработан алгоритм генерализации исходных лесотаксационных данных, позволяющий сократить объем вычислений при моделировании без существенного ущерба для точности прогноза.

Работа поддержана Программой 16 Президиума РАН «Изменения природной среды и климата: природные катастрофы» и грантом РФФИ 09-04-01209.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling // *Ecological Modelling*. 2001. 138. P. 289-308.
2. Gordon C.; Cooper C., Senior C.A., Banks H., Gregory J.M., Johns T.C., Mitchell J.F.B., Wood R.A. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments // *Climate Dynamics*. 2000. 16. P. 147-168.
3. Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L., Nadporozhskaya M.A., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S., Zudina E.V., Zoubkova E.V. EFIMOD 2 – A model of growth and elements cycling of boreal forest ecosystems // *Ecological Modelling*. 2003. 170. P. 373-392.
4. Verkerk, P.J., J. Eggers, M. Lindner, V.N. Korotkov, S. Zudin, 2006. Impact of wood demand and management regime on forest development and carbon stocks in Kostroma region. Proceedings of the international scientific conference on modern problems of sustainable forest management, inventory and monitoring of forests. St. Petersburg, 2006. P. 370-379.
5. Желдак В.И., Атрохин В.Г. Лесоводство: Учебник. Часть I. / М.: ВНИИЛМ, 2003. 336 с.
6. Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Коровин Г.Н., Куриц В.А. Оценка и прогноз углеродного бюджета лесов по канадской модели CBM-CFS // *Лесоведение*. 2008. № 6. С. 3-14.
7. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. / [отв. ред. В.Н. Кудеяров]. М.: Наука, 2007. 380 с.
8. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В., Коровин Г.Н., Зукерт Н.В. Леса России как резервуар органического углерода биосферы // *Лесоведение*. 2001. № 5. С. 8-23.

EFFECT OF FOREST MANAGEMENT REGIME AND CLIMATE CHANGE ON NUTRIENTS BALANCE IN FOREST ECOSYSTEMS: MODEL APPROACH

© 2009 V.N. Shanin¹, A.V. Mikhailov¹, A.S. Komarov²

¹Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of RAS, Pushchino;
e-mail: shaninvn@gmail.com; alexey.mikh@gmail.com

²Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of RAS, Pushchino;
e-mail: as_komarov@rambler.ru

The model system EFIMOD was used to simulate forest vegetation dynamics at regional scale. Model inputs were taken from forest inventory data; data generalization procedure has been developed. Simulation was carried out under different climatic scenarios and forest management regimes. It was demonstrated that management has much more significant effect on carbon balance in forest ecosystem than climate change.

Key words: *Imitating modeling, forest management, carbon balance.*