

УДК 631.481+631.92+630:004.92

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ УГЛЕРОДА ПОЧВЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ТРАДИЦИОННОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ И ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

© 2009 М.В. Бобровский¹, А.С. Комаров¹, В.Н. Шанин¹,
С.С. Быховец¹, А.В. Михайлов¹, Л.Г. Ханина²

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Московская область, г. Пущино, e-mail: maxim.bobrovsky@gmail.com, as_komarov@rambler.ru, shaninvn@gmail.com, s_bykhovets@rambler.ru, lexey.mikh@gmail.com

²Институт математических проблем биологии РАН, Московская область, г. Пущино, E-mail: lkhanina@rambler.ru

Модель EFIMOD использована для прогноза и анализа динамики углерода почвы при 4 типах сценариев традиционного природопользования, характерных для лесных территорий Европейской России: подсечно-огневое земледелие, переложное земледелие, паровое земледелие (трехполье), рубки. Результаты моделирования показали, что все сценарии природопользования ведут к уменьшению запасов углерода почвы по сравнению с его запасом при свободном развитии лесной экосистемы. При трехполье с удобрением почвы запас углерода стабилизируется. При других сценариях стабилизации не происходит, интенсивность потерь углерода почвы увеличивается в ряду: рубки – подсечно-огневое земледелие – переложное земледелие.

Ключевые слова: имитационное моделирование, подсечно-огневое земледелие, переложная система земледелия, трехполье, рубки, EFIMOD, ROMUL

Обычно при моделировании циклов круговорота элементов время начала значимых антропогенных воздействий на наземные экосистемы относят к середине XIX в. [12]. Однако, на примере Европейской России можно сказать, что задолго до этого времени практически вся эта территория испытывала на себе разнообразные виды интенсивных антропогенных воздействий. Большинство воздействий были связаны с традиционными системами земледелия - подсечно-огневой, переложной и паровой (трехполье), а также с использованием лесных ресурсов (прежде всего, древесины). Длительная история антропогенных воздействий привела к изменению состава и структуры экосистем и, по-видимому, к существенным изменениям биогеохимических циклов основных биофильных элементов, прежде всего, углерода [14, 15].

Количественно оценить влияние длительных антропогенных воздействий на природные системы практически невозможно без привлечения математических моделей. Использование последних позволяет получить, в частности, оценки параметров накопления и деструкции органического вещества в экосистемах, количественно оценить вклад внешних факторов в изменение баланса и распределение соединений в пулах экосистем.

Ранее нами был предложен модельный подход для оценки динамики органического вещества почвы при традиционных системах земледелия [9]. Целью настоящей работы является

прогноз и анализ долговременной динамики углерода почвы в стационарных климатических условиях при различных системах традиционного земледелия и лесопользования, типичных для территории Европейской России.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Долговременную динамику углерода почвы (С) при различных антропогенных воздействиях оценивали для суглинистых дерново-подзолистых почв. Использовали систему моделей биологического круговорота углерода и азота в лесных экосистемах EFIMOD [13] вместе со встроенной в нее почвенной моделью ROMUL [10]. Использование модели EFIMOD для оценки динамики С при традиционном природопользовании обусловлено тем, что в исторических системах земледелия лесная стадия является одним из обязательных элементов. Поэтому оценить вклад таких систем земледелия в общую динамику экосистемы и баланс элементов возможно только при условии использования модели, хорошо симулирующей динамику лесных экосистем.

Для инициализации модели имитировали свободное развитие леса в стационарных климатических условиях до стабилизации уровня С почвы. Естественное возобновление древостоя моделировали путем «подсадки» каждые 15 лет 5-летних семян основных видов деревьев – ели, липы, дуба, сосны, березы, осины с плотностью каждого вида 700 шт./га. Этап инициализации

модели составил 370 лет; в итоге «сформировался» смешанный разновозрастный лес с доминированием позднесукцессионных видов деревьев.

Далее моделировали свободное развитие леса и 4 типа сценариев антропогенных воздействий.

(1) Подсечно-огневое земледелие (SB) с разной частотой воздействий. Цикл: посев на расчистках 3 года, периоды между расчистками 20, 40, 60, 80 и 120 лет.

(2) Переложное земледелие (ShS). Циклы: 10, 20 лет пашни и 10, 20 лет развития леса.

(3) Паровая система земледелия в виде трехполья. Без внесения удобрения (TFF) и с внесением удобрения (TF) один раз в 3, 9 и 18 лет.

(4) Рубки сплошные и выборочные. Сплошные рубки (CC) с оборотом 10, 20 лет (дровяные леса) и 40, 60, 80, 120 лет (строевые леса). Принудительно-выборочные рубки (SC) с изъятием древесины один раз в 30 лет в объеме 30% древесины по запасу «сверху».

В разработанных «земледельческих» сцена-

риях использовали посев озимых и яровых культур с разделением на надземные и подземные когорты опада и определенным временем их поступления на/в почву. Для сравнения результатов продолжали также моделировать «свободное развитие леса» (сценарий F). Всего было смоделировано 22 сценария природопользования на срок 260 лет с шагом моделирования 1 год.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования показали, что максимальный уровень содержания С сохраняется при естественном развитии лесной экосистемы (рис. 1, А, сценарий F). Средний за период воздействия запас С в почве уменьшается в ряду: (а) свободное развитие леса – (б) строевой лес – (в) дровяной лес, выборочные рубки, трехполье с удобрением раз в 3 года – (г) подсека с оборотом 40 – 120 лет, трехполье с удобрением раз в 9 и 18 лет – (д) подсека с оборотом 20 лет – (е)

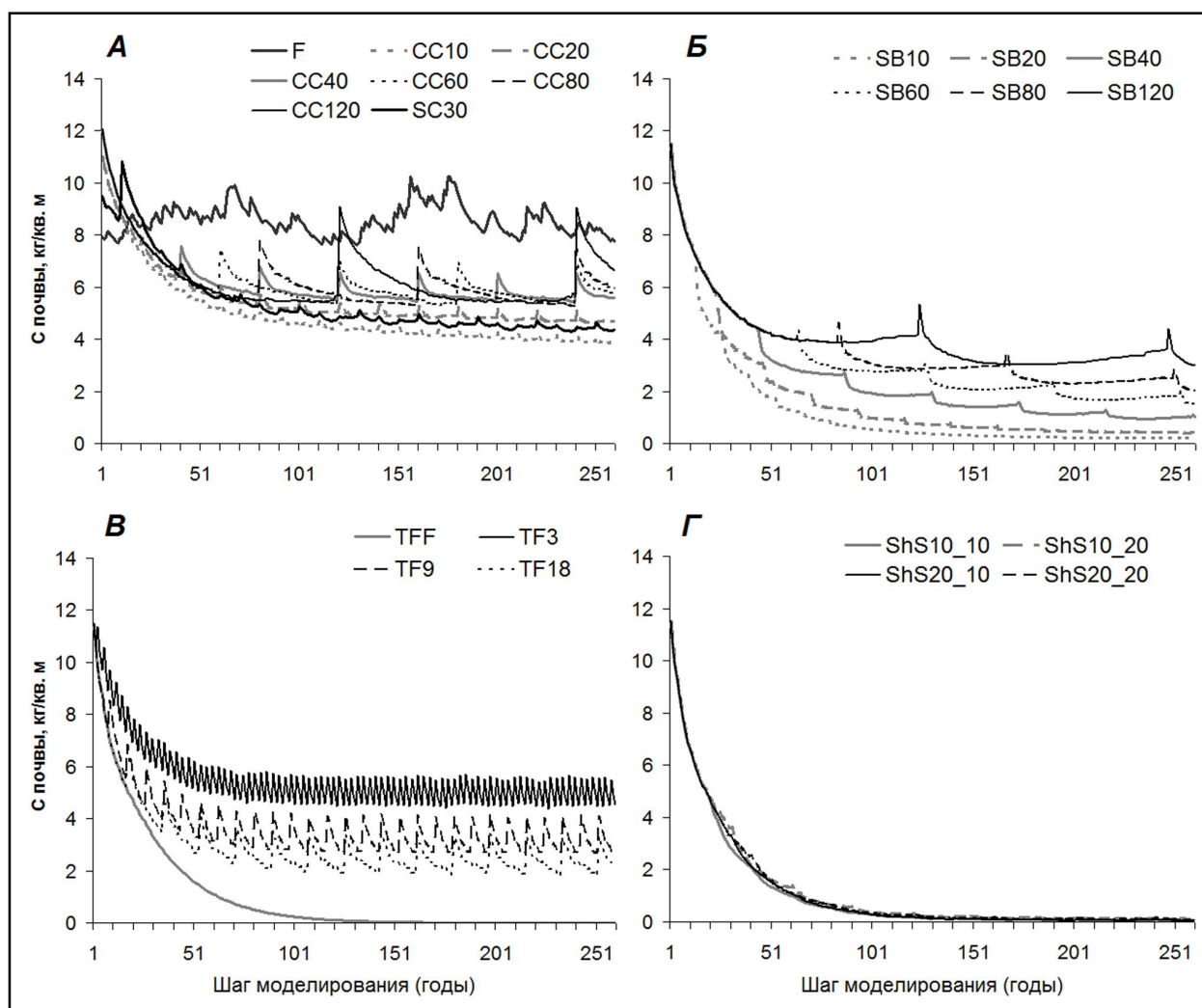


Рис. 1. Динамика углерода почвы после начала антропогенных воздействий: А – сценарии рубок и свободного развития леса; Б – сценарии подсечно-огневого земледелия; В – сценарии трехполья; Г – сценарии перелога.

Обозначения сценариев в тексте

все варианты перелога и трехполье без удобрения (рис. 2).

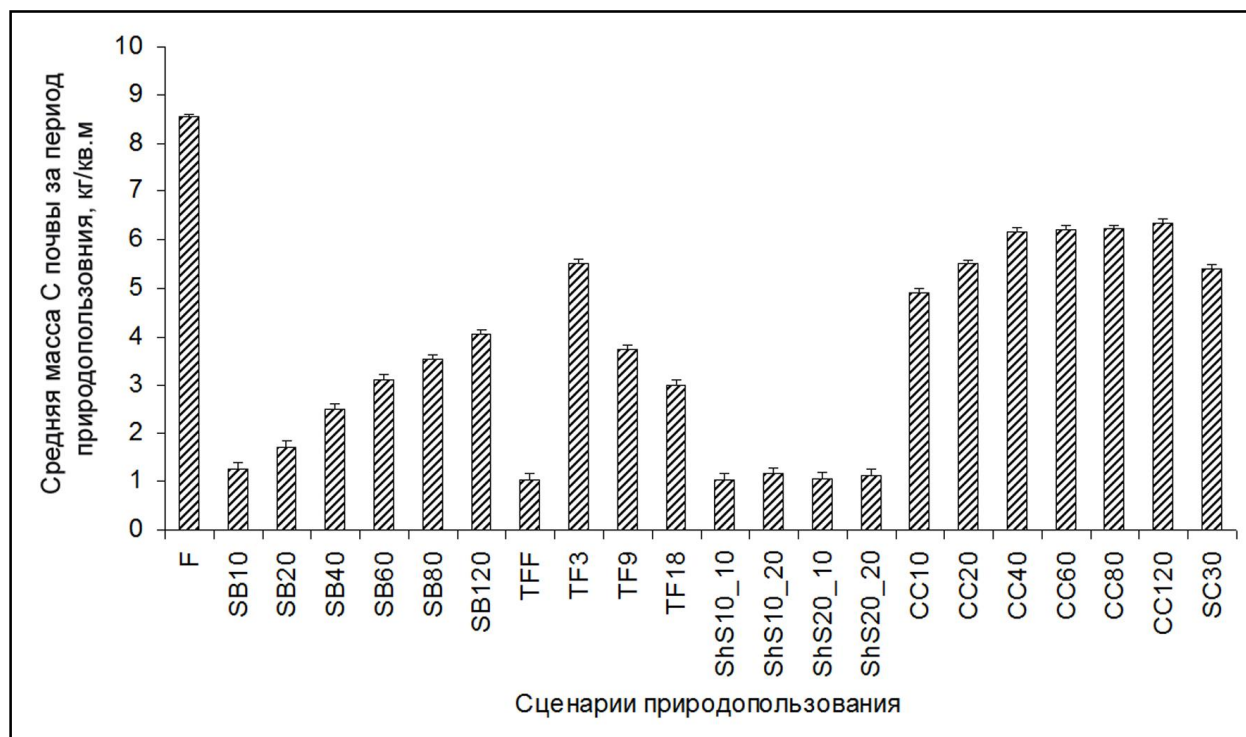


Рис. 2. Средняя масса углерода почвы при разных сценариях природопользования за 260-летний период моделирования: черта над столбцом показывает величину ошибки среднего. Обозначения сценариев в тексте

При оборотах *рубки* от 40 до 120 лет (строгие леса) наблюдали снижение содержания С относительно «фоновой» лесной почвы при отсутствии заметного «накопления потерь» - относительной стабилизации запаса С за период между рубками (рис. 1, А). Хорошо заметно отличие динамики С почвы для дровяных лесов (сплошная рубка с оборотом 10 и 20 лет) по сравнению со строевыми лесами: с течением времени происходит уменьшение содержания С «с накоплением потерь» (стабилизации запаса С за время между рубками не происходит). Малый оборот рубки деревьев ведет к большим потерям С почвы, поскольку в молодом состоянии деревья тратят больше питательных веществ, чем отчуждают с опадом. Так, период наибольшего прироста органического вещества и потребления наибольшего количества элементов питания наблюдается в дубняках в возрасте около 25 лет, осинниках – около 30 лет, сосняках – 30 – 50 лет [6]. Сценарий принудительно-выборочных рубок (SC30) показал динамику С почвы, близкую к его динамике в дровяных лесах.

Подсечно-огневую систему земледелия на территории центра Европейской России применяли на протяжении более 4000 лет [2]. При этом еще в XIX – начале XX в. в России подсеку, и крестьяне, и специалисты в сельском хозяйстве рассматривали как более выгодную альтернативу

навозной пашне [4]. Эффективность подсечи зависит от уровня восстановления почвенного плодородия во время «отдыха» – свободного развития леса, что демонстрируют и результаты моделирования (рис. 1, Б, рис. 2). При большой длительности лесной фазы (сценарий SB120) уровень содержания С в почве сравним с трехпольем (сценарий TF9). При всех вариантах подсечи наблюдается ступенчатое уменьшение содержания С в почве, при этом содержание С падает непропорционально уменьшению периода отдыха. При сценариях SB10 и SB20 содержание С уменьшается как на сельскохозяйственной, так и на лесной фазе, при SB40 и SB60 наблюдается стабилизация содержания С на лесной фазе, при SB80 и SB120 – частичная компенсация содержания С на лесной фазе.

Для территории России нет массовых количественных данных по варьированию сроков отдыха и урожайности при подсеке, но они есть для Финляндии. За два века в Финляндии оборот рубки при подсеке сократился с 40 до 25 лет, а урожайность зерновых на лесных полях уменьшилась в 2 раза [2].

Некоторые исследователи относят подсечно-огневое земледелие к «естественным экзогенным» нарушениям [8], мотивируя это тем, что после таких нарушений происходит восстановление «первичных лесов». Наши результаты пока-

зывают, что даже 120 лет спонтанного развития в рассматриваемых условиях не хватает для восстановления запасов органического вещества почвы. В историческое время срок спонтанного развития леса при подсеке составлял 25 – 80 лет [2, 4].

Трехполье считают крупнейшим достижением европейской агрокультуры средневековья. Распространение трехполья в Европейской России относят к XI – XIII в. Трехполье поставило урожайность в прямую зависимость от качества обработки и удобрения земли; последнее служило главным фактором поддержания почвенного плодородия. Результаты моделирования показывают, что при трехполье содержание С в почве зависит от качества (частоты) удобрения (рис. 1, В, рис. 2). Позитивный, но кратковременный эффект внесения навоза или компоста подтверждается экспериментальными данными [5, 11].

Сценарий TF3 близок к представлению об идеальной системе «органического земледелия». На территории России такую систему применяли только на отдельных полях для выращивания требовательных к удобрению почвы культур (например, конопли) и в огородном хозяйстве. По расчетам, для нормального удобрения соотношение площадей пашен и лугов должно составлять 1:1,24 [4]. Такое соотношение угодий в центральной России в историческое время не достигалось. Например, в конце XVIII века площади сенокосов были ниже расчетной нормы в Московской губернии в 4,9 раз; Псковской – 8,2; Смоленской – 10,4; Ярославской – 6,3; Костромской – 6,1; Калужской – 10,0; Тульской – 11,4 раз [4, с. 216]. По данным источников XVII - XIX вв., навоз на пашни вносился нерегулярно, в среднем один раз в 7 – 12 лет. При этом речь идет о полях, ближних к поселениям, дальние поля не унавоживались вовсе [1, 4]. Таким образом, сценарий TF9 соответствует режиму землепользования в богатых помещичьих и монастырских хозяйствах. Сценарий TF18 имитирует уровень агрокультуры хозяйства бедного, но использующего удобрение.

Время «потери силы» земель при отсутствии удобрения по источникам XVIII в. оценивалось в 10 – 30 лет [4]. Это демонстрирует сценарий TF. При распашке именно в первые годы все почвы теряют до 20-40% общего содержания гумуса, затем темпы минерализации снижаются [3, 5], однако почва теряет способность расширенного воспроизводства посевного материала.

Переложная система земледелия была компромиссным средством поддержания почвенного плодородия при отсутствии возможностей как нормально удобрить участок, так и превратить его в залежь. Как и в случае подсеки, скорость уменьшения содержания гумуса зависит от вре-

мени свободного развития леса (рис. 1, г). Результаты моделирования показали слабые различия в характере динамики С почвы при разных сценариях переложного земледелия (рис. 2). В целом перелог характеризуется быстрым падением содержания С в почве, которое не компенсируется в промежутки свободного развития леса. При уменьшении времени ротации наблюдается более резкое падение содержания С как на полевой, так и на лесной фазах перелога. Широкое использование лесного перелога на территории Европейской России в XV - XIX вв. могло быть более эффективным скорее для получения дополнительной дровяной древесины, чем для значимого улучшения качества пашни.

К сожалению, данные для верификации результатов моделирования по большинству сценариев природопользования отсутствуют. Однако сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными для крайних вариантов сценариев паровой системы (TF и TF3) показало их хорошее соответствие. Относительные скорости потерь гумуса по результатам моделирования соответствуют результатам долгосрочных полевых экспериментов [5]. Очень близки они и к результатам изучения содержания гумуса в почве после 20-летнего использования [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показали, что при всех сценариях традиционного природопользования происходит уменьшение запасов углерода почвы по сравнению с его запасом при свободном развитии лесной экосистемы. Восстановление запаса С происходит при длительном развитии леса либо при удобрении почвы. Чем выше частота удобрения, тем на более высоком уровне стабилизируется запас углерода. При других сценариях природопользования стабилизация запаса С не происходит, интенсивность потерь С почвы увеличивается в ряду: рубки – подсечно-огневая система земледелия – переложная система и паровая система без удобрения.

За тысячи лет активного присутствия человека на одной и той же территории происходили разнообразные смены воздействий – чередовались периоды интенсивной эксплуатации земель, активного лесопользования и восстановления леса [1]. Вплоть до XX в. в центральной Европейской России преобладали комбинированные системы земледелия, сочетавшие трехпольный севооборот с периодическим обновлением основного массива пашенных земель за счет перелогов и подсеки [4]. Полученные при помощи моделирования результаты показывают, что приро-

допользование в доиндустриальную эпоху могло оказывать существенное воздействие на глобальный цикл углерода.

Использование данных по соотношению распространения различных систем природопользования позволяет подойти к модельному эксперименту по влиянию хозяйства на структуру и состав лесных экосистем на локальном и региональном уровнях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бобровский М.В.* Лесные почвы: биотические и антропогенные факторы формирования // Восточноевропейские леса. История в голоцене и современность / Под ред. О.В. Смирновой. М.: Наука, 2004. Кн. 1. С. 381-427.
2. История крестьянства в Европе. Эпоха феодализма. Т. 1. М.: Наука, 1985. 569 с.
3. *Золотарева Б.Н., Демкина Т.С., Петрова Л.И., Стулин А.Ф.* Изменение содержания и состава гумуса при сельскохозяйственном использовании почв // Биопродуктивность агроценозов как комплексная проблема. Пушкино, 1989. С. 28-43
4. *Милов Л.В.* Великорусский пахарь и особенности российского исторического процесса. М.: РОССПЭН, 1998. 573 с.
5. *Перепелица В.М.* Роль органических и минеральных удобрений в накоплении гумуса почвы // Почвоведение. 1974. № 3. С. 29-37.
6. *Ремезов Н.П.* Разложение лесной подстилки и круговорот элементов в дубовом лесу // Почвоведение. 1961. № 7. С. 2-12.
7. *Хохлов В.Г.* Органическое вещество дерново-подзолистых почв Смоленской области. Дис. на соиск. учен. степ. канд. биол. наук. М., 1980.
8. *Attiwill P.M.* The disturbance of forest ecosystems: the ecological basis for conservative management // For. Ecol. Manage. 1994. V. 63. P. 247-300.
9. *Bobrovsky M., Komarov A., Kubasova T., Mikhailov A.* Modelling dynamics of soil organic matter under historical land-use management in European Russia // The 6th European conference on ecological modelling ECEM'07. Conf. proceedings. Challenges for ecological modelling in a changing world: global changes, sustainability and ecosystem based management. Trieste, OGS-ICTP, 2007. P. 70-71.
10. *Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A. et al.* ROMUL - a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling // Ecological modelling. 2001. V. 138. P. 289-308.
11. *Debosz K., Petersen S.O., Kure L.K., Ambus P.* Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties // Appl. Soil Ecol. 2002. V. 19. P. 237-248.
12. *Denman K.L., Brasseur G., Chidthaisong A. et al.* Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry // In: Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the 4th Assessment Report Of the IPCC. Cambridge University Press, UK and NY USA: 2007.
13. *Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L. et al.* EFIMOD 2 - a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecol. model. 2003. V. 170. P. 373-392.
14. *Lal R.* Forest soils and carbon sequestration // For. Ecol. Manage. 2005. V. 220. P. 242 – 258.
15. *Song C., Woodcock C.E.* A regional forest ecosystem carbon budget model: impacts of forest age structure and landuse history // Ecol. Model. 2003. V. 164. P. 33-47.

MODELLING OF SOIL CARBON DYNAMICS UNDER DIFFERENT SYSTEMS OF FORESTRY AND HISTORICAL TRADITIONAL LANDUSE IN THE EUROPEAN RUSSIA

© 2009 M.V. Bobrovsky¹, A.S. Komarov¹, V.N. Shanin¹, S.S. Bykhovets¹,
A.V. Mikhailov¹, L.G. Khanina²

¹Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of RAS, Moscow Region, Pushchino.

²Institute of Mathematical Problems in Biology of RAS, Moscow Region, Pushchino.

The effects of different historical land-use and forest management systems on soil carbon dynamics in the Central European Russia have been assessed using the model of carbon and nitrogen cycling in forest ecosystems EFIMOD. The following agricultural and forest management scenarios were simulated: (a) slash-and-burn system with various years for crops and forest; (b) three-field crop rotation system with and without organic fertilization; (c) short-term field-forest shifting system, (d) clear cutting forest management system with various rotation years, and (e) selective cutting forest management system. Simulated results showed that soil carbon essentially decreases under frequent agricultural impacts either without fertilization or without prolonged forest stage.

Key words: simulation modelling, slash-and-burn system, field-forest shifting system, three-field crop rotation, forest cutting, EFIMOD, ROMUL.