

УДК 631.618 + 631.442.5 : 004.942

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ КАРЬЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ ROMUL

© 2009 М.А. Надпорожская¹, Е.В. Абакумов¹, О.Г. Чертов²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург,
e-mail: biosoil.bio.pu.ru

² University of Applied Sci., Bingen, Germany, e-mail: chertov@fh-bingen.de

Вычислительные эксперименты с имитационной моделью динамики органического вещества почв ROMUL показали, что рекультивация нетоксичных суглинистых грунтов промышленных карьеров наиболее эффективна при сочетании искусственного восстановления системы органического вещества почвы и растительности (разнотравно-злаковой смеси и саженцев ели). Произведена оценка экологически оптимальных доз внесения торфа при рекультивации.

Ключевые слова: *рекультивация, нарушенные промышленные земли, органическое вещество почв, математическая имитационная модель.*

ВВЕДЕНИЕ

Площадь земель, нарушенных в результате открытых горных разработок на территории Северо-Запада Русской равнины, составляет около 0,1%. Интенсивные исследования сравнительной эффективности самозарастания и рекультивации таких нарушенных земель проводятся сравнительно недавно, с 70-х годов XX в. Основными приемами биологической рекультивации техногенных отвалов служат внесение торфа, подсев разнотравно-злаковых смесей, лесопосадки. Полевые наблюдения показали, что временные стадии восстановления почв при рекультивации могут ускоряться по сравнению с самозарастанием примерно на 10 лет. Но проведение рекультивационных мероприятий нарушенных ландшафтов на Северо-Западе России значительно отстает от других регионов страны. Причина малой популярности рекультивации – экономическая и экологическая неэффективность проводимых мероприятий [1, 4].

При рекультивации техногенных отвалов восстановление растительности и почвы значительно ускоряется за счет внесения семян растений, удобрения почвы. Органические удобрения способствуют накоплению биомассы, улучшают физико-химические свойства минеральных грунтов. Важно определить стартовую дозу внесения удобрений, обеспечивающую продукционные процессы и не дающую избытка непродуктивных потерь, приводящих к загрязнению атмосферы и грунтовых вод.

Для оптимизации доз и видов вносимых органических удобрений, уменьшения непродуктив-

ных потерь биофильных элементов на начальных этапах можно применять имитационные вычислительные эксперименты с использованием математических моделей. Модель динамики органического вещества почв ROMUL была широко использована для анализа функционирования и прогноза изменений педогенной основы лесов Восточной России и других стран [5]. Модель ROMUL может быть использована также для объективизации процедур оценки воздействия на окружающую среду и прогнозирования эффективности почвовосстановления. Первая подобная попытка применения математической модели для оценки эффективности рекультивации нарушенных территорий была предпринята О.Г. Чертовым с соавторами. [9]. Вычислительные эксперименты производили с помощью модели экосистемы леса EFIMOD, где в качестве почвенной подмодели использована ранняя версия модели ROMUL. Вычислительные эксперименты показали, что темпы рекультивации сильно зависят от стартового внесения удобрений в виде грубого гумуса или компоста (C:N соответственно 25 и 15) и поступления азота из атмосферы (4 и 15 кг/га в год). Все варианты показали преобладание процессов минерализации внесенных органических удобрений. Преобладание аккумуляции органического вещества в почве начиналось только после достижения определенных стадий роста сосны. Использованная версия модели EFIMOD имитировала разложение внесенного удобрения, аккумуляцию биомассы древостоя и гумуса в почве, т.е. имитировала динамику органического вещества в системе «удобрения-почва-деревья», без учета влияния напочвенного покро-

ва, который обеспечивает более полное использование освобождающихся в процессе минерализации веществ и может позволить сократить непродуктивные минерализационные потери стартовых удобрений. Простой балансовый агрохимический расчет здесь неприменим, так как зависимости динамических взаимодействий минерализации, гумификации и роста растений достаточно сложны. Версия лесной экосистемной модели с напочвенным покровом находится в стадии разработки [5]. Поэтому для вычислительных экспериментов в настоящей работе мы использовали модель динамики органического вещества почв ROMUL, которая дает возможность учета поступления любых когорт органического вещества – опада трав, деревьев, органических удобрений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Задачей работы было применение модели ROMUL для оценки эффективности и выбора оптимальных приемов восстановления почв под посадками ели на нетоксичных суглинистых грунтах в условиях климата Лужского района Ленинградской области.

Математическая модель ROMUL детально описана ранее [8, 9]. В основу модели положена математическая формализация концепции типов гумуса лесных почв как сукцессионных стадий трансформации органического вещества почв, отмечаемой превалированием различных групп организмов-деструкторов. Входные параметры: количество поступающего органического вещества, содержание азота и золы по когортам, запасы органического вещества и азота в почве и ее объемная масса. Климатические параметры: температура и влажность лесной подстилки и почвы. Используются среднемесячные значения. Модель рассчитывает динамику органического вещества почвы в лесной подстилке, минеральной части профиля почвы и соответствующие запасы азота. Модель также показывает количество углекислого газа и доступного растениям минерального азота, выделившихся при разложении органического вещества.

Варианты вычислительных экспериментов. *Вариант 1 (контроль)*. Имитировали последовательное увеличение поступающего на почву опада от 0 до 180 г/м² за год в 100-летнем ельнике (N 0,9 и 0,5% в хвое и ветках, соответственно). Равным напочвенному принимали корневой опад (N 0,5%), доли поступления которого в лесную подстилку и почву рассчитывали по экспертной оценке О.Г. Чертова распределения корней в зависимости от мощности лесной подстилки (в данном случае для 100 летнего леса 45% и 55%

корневого опада поступало на и в почву, соответственно). Влияние приемов рекультивации изучали в следующих вариантах: 2 - подсев разнотравно-злаковой смеси (N в напочвенном и корневом опаде трав соответственно 1,0 и 0,8%), с возрастающе - сокращающимся опадом в течение 20 лет, с максимумом 100 г/м² за год и долей опада корней 70%; 3 - стартовое внесение в почву торфо-гумусовой смеси 1 кг/м²: 30% торфа (C/N 25) и 70% гуматов (C/N 10); 4 - подсев разнотравно-злаковой смеси и внесение в почву торфо-гумусовой смеси 1 кг/м² – сочетание вариантов 2 и 3; 5 - стартовое внесение на/в почву торфа 1, 2, 3, 4 кг/м² (C/N 25).

Варианты 3 и 4 нуждаются в дополнительном пояснении. Традиционно применяют только низинный или переходный торфы, что фактически восстанавливает только лабильную часть гумуса, т.е. комплекс гумусовых веществ с частично разложенными растительными остатками (как в варианте 5). В вариантах 3 и 4 сделана попытка имитации восстановления целостной системы органического вещества почв. Предполагается, что восстановление стабильного гумуса можно обеспечить внесением растворов искусственно синтезированных гумусовых веществ, способных к адсорбции минеральной частью почвы, а торф соотнесен с лабильной частью. Пробные лабораторные эксперименты по исследованию устойчивости искусственных гуматов после внесения их в почву предполагают возможность применения такого приема при восстановлении почв [6].

Климатические параметры. Нами были составлены сценарии изменения температуры и влажности суглинистой почвы Лужского района Ленинградской области (Табл. 1). Компилировали температуру лесной подстилки и почвы, принимая во внимание, что температура воздуха самых холодного и теплого месяцев (-8,9) и (+)16,6°C. Изменение в течение года влажности лесной подстилки и минеральной части профиля почвы задали в диапазоне 100-400 и 40-60 весовых % соответственно. В проведенных вычислительных экспериментах действие нерегулярных факторов (ветровалов, снегопадов, насекомых, инфекций) не учитывали.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты вычислительных экспериментов показали, что при имитации влияния только опада ели восстановление лесной подстилки и лабильной части гумуса происходит за 100 лет, стабильный гумус продолжает накапливаться замедленными темпами и после 200 лет (рис. 1). Это соответствует литературным данным о характерном времени формирования основных морфоло-

Таблица 1. Среднемесячные значения температуры и влажности.

Месяц	Т, °С		Влажность, вес. %	
	воздуха	почвы	Лесной подстилки	почвы
1	-8,9	-0,5	400	60
2	-8,0	-1,0	400	60
3	-4,3	-1,0	400	60
4	3,3	2,0	400	60
5	10,6	9,0	300	60
6	14,8	14,4	200	50
7	16,6	16,0	100	40
8	15,1	14,5	200	50
9	9,6	10,0	300	60
10	4,1	5,0	400	60
11	-2,0	1,0	400	60
12	-7,0	0,0	400	60

гических свойств в подзоне южной тайги на тяжелых породах [2] и данным по запасам органического вещества в почвах зональных лесов – 5,8-6,9 кг/м² [7].

Посев разнотравно-злаковой смеси, внесение торфо-гумусовой смеси повышают общие запасы органического вещества почвы, это влияние

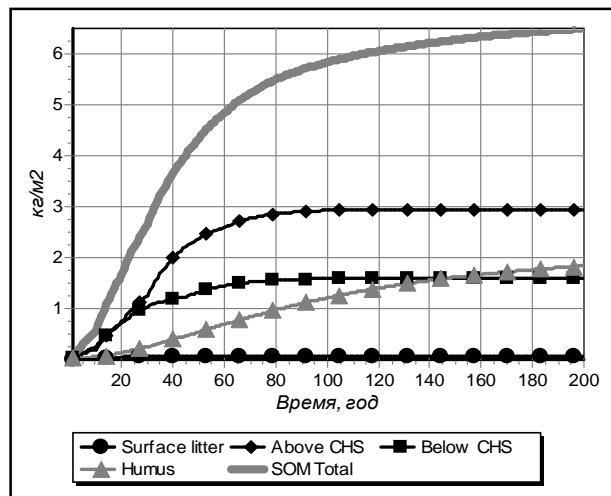


Рис. 1. Аккумуляция органического вещества в почве восстановительной сукцессии елового леса: Above CHS - лесная подстилка; Below CHS - частично разложенные растительные остатки в почве; Humus - специфические гумусовые вещества в почве; SOM total - органическое вещество почвы

сохраняется 40-50 лет. Общие запасы органического вещества в почве во всех вариантах становились равными через 50 лет (рис. 2). Используемая версия модели ROMUL не представляет возможности вычлнить роль гуматов, вносимых с торфом. Этот вопрос остается открытым как в плане преобразования структуры модели, так

и для изучения в лабораторных и полевых экспериментах.

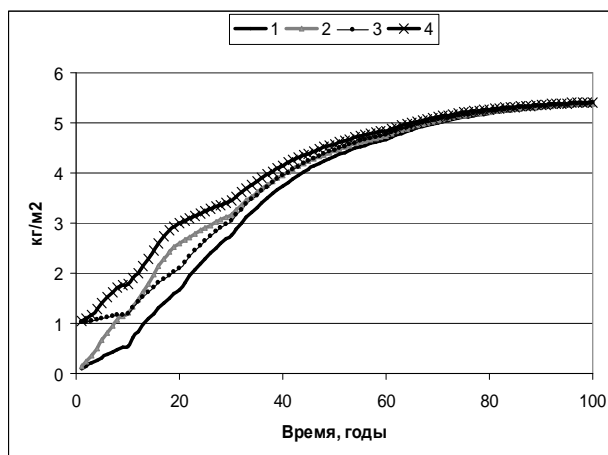


Рис. 2. Аккумуляция органического вещества в почве восстановительной сукцессии елового леса: 1 - контроль, 2 - посев злаково-разнотравной смеси, 3 - внесение торфо-гумусовой смеси в почву, 4 - посев трав и внесение торфо-гумусовой смеси в почву

В последние годы главным принципом для управления экосистемами декларируется сохранение всех параметров и процессов экосистемы, находящейся в состоянии оптимального функционирования без признаков деградации [10]. В развитие принципов устойчивого природопользования и самовоспроизводства лесных экосистем был предложен почвенный критерий устойчивости: сохранение запасов органического вещества почвы. В настоящий момент представляется интересным произвести расчет доз органических удобрений для получения сбалансированного биологического круговорота и предотвращения непродуктивных минерализационных потерь. В наших вычислительных экспериментах этому условию соответствуют дозы органических удобрений 1-2 кг/м² (10-20 т/га). После внесения 30 т/га торфа на поверхность почвы преобладают процессы минерализации (рис. 3А). При внесении торфа 30 т/га запахованием в почву непродуктивные потери лабильной фракции органического вещества почвы определены в первые 10 лет (рис. 3Б). Подсев трав (при общей массе их опада 100 г/м²) компенсирует непродуктивные потери удобрений (рис. 3В).

Биомасса высеянных на рекультивируемых субстратах травосмесей может достигать и гораздо больших величин, до 500-600 г/м² [3]. Эта величина зависит от почвенных и климатических условий, а также биологических особенностей растений и требует отдельных вычислительных экспериментов. Вероятно, дозы вносимых

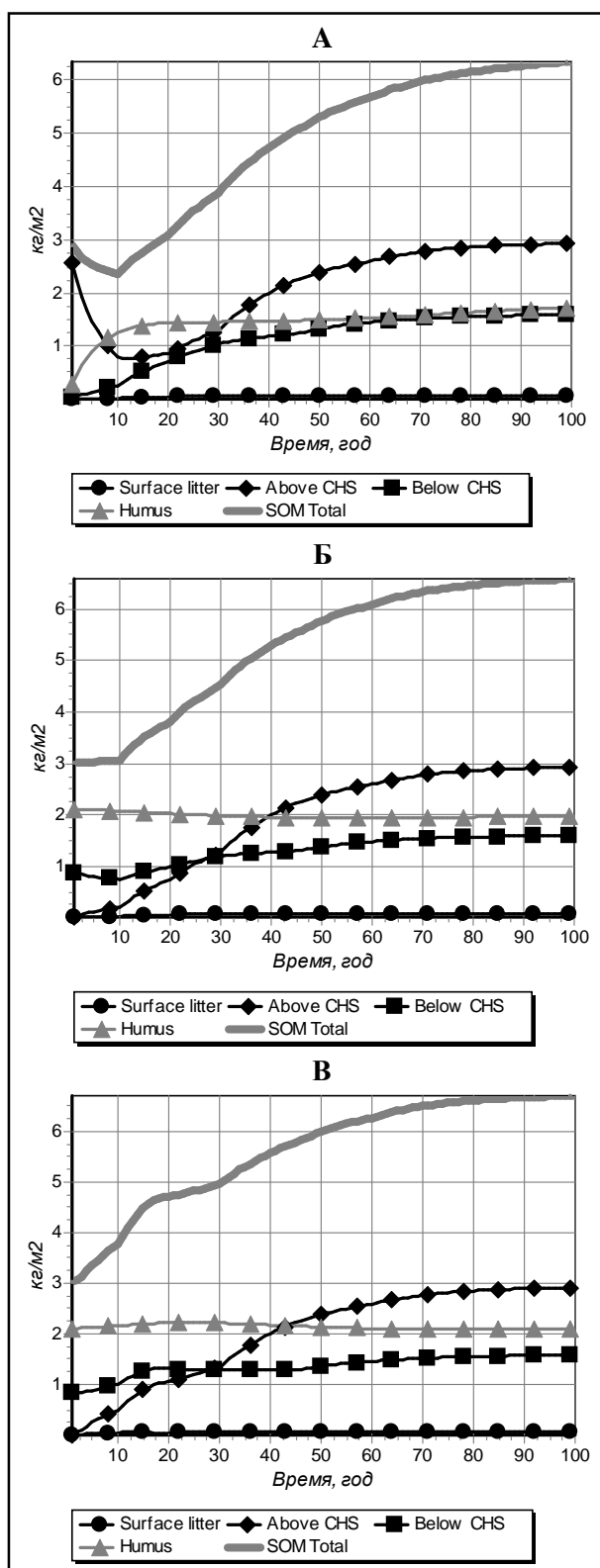


Рис. 3. Аккумуляция органического вещества в почве восстановительной сукцессии елового леса. Обозначения как на рис. 1. Варианты вычислительных экспериментов: А - торф, 3 кг/м², внесение на поверхность почвы; Б - торф, 3 кг/м², внесение запахиванием в почву; В - Торф, 3 кг/м², внесение запахиванием в почву, и посев трав, дающих опад 100 г/м²

органических удобрений могут быть повышены как в случае подсева и развития обильной биомассы трав на первых этапах рекультивации, так и в условиях более холодного климата, когда скорости трансформации органического вещества значительно понижаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные нами пробные вычислительные эксперименты показывают перспективность использования математических моделей для оценки эффективности рекультивационных мероприятий. Долгосрочные прогнозы развития экосистем трудно проверить экспериментально. Математическое моделирование начальных этапов восстановления растительности и почвы на минеральных грунтах, проходящих достаточно быстро (различия между вариантами существенны и выявляются на протяжении первых 5-10 лет) можно подтвердить (или опровергнуть) полевыми опытами.

Развитие работ по прогнозированию скорости восстановления и оценке эффективности рекультивации – в уточнении физико-химических характеристик: содержания азота в когортах опада и изменения микроклимата по стадиям зарастания минеральных субстратов; изменения свойств минеральных субстратов после стартового внесения органических удобрений (водоудерживающей способности, теплоемкости). Следует учитывать специфику минералогического и гранулометрического состава литогенной основы. Существенный момент исследований – учет гетерогенности условий и свойств поверхности минерального субстрата, а также неравномерности поступления опада на начальных этапах зарастания. Важен, особенно для промышленных районов, учет поступления в почву азота с атмосферными выпадениями. Необходимо сочетать исследования в долгосрочных стационарных наблюдениях, физических лабораторных и полевых экспериментах с имитационным математическим моделированием. Перспективны оценка гетерогенности почвенно-растительного покрова и развитие приемов математического моделирования его динамики.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-04-01128).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов Е.В., Гагарина Э.И. Почвообразование в посттехногенных экосистемах карьеров на Северо-Западе Русской равнины. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2006. 208 с.
2. Александровский А.Л. Развитие почв восточ-

- ной Европы в голоцене: Дис. ... докт. биол. наук. М., 2002. 48 с.
3. Андроханов В.А., Овсянникова С.В., Курачев В.М. Техноземы: свойства, режимы, функционирование. Новосибирск: Наука. 2000. 200 с.
 4. Капелькина Л.П. Экологические аспекты оптимизации техногенных ландшафтов. СПб.: ПРОПО, Наука, 1993. 191 с.
 5. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. (Отв.ред. В.Н. Кудяров.) М.: Наука, 2007. 380 с.
 6. Федорос Е.И., Надпорожская М.А., Шипов В.П., Чертов О.Г. Препараты гуминовых веществ для сельского и городского хозяйства – оспользование для рекультивации и реабилитации почв // Фундаментальные основы инновационных биологических проектов в «Наукограде». Сб. статей. СПб.: Изд-во С.-Петербур. унта, 2008. С. 179-203.
 7. Чертов О.Г. Экология лесных земель. Л.: Наука. 1981. 192 с.
 8. Chertov O.G. Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.A., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modelling. *Ecological Modelling/ 2001: V. 138 № 1-3. P. 289-308.*
 9. Chertov. O.G. Komarov. A.S., Tsiplianovsky. A.V. Simulation of soil organic matter and nitrogen accumulation in Scots pine plantations on bare parent material using forest combined model EFIMOD. *Plant and Soil. 1999. V. 213. P. 31-41.*
 10. Helsinki Process. European Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management Adopted by the Expert Level Follow-up Meetings of the Helsinki Conference in Geneva (24 June 1994) and in Antalya (23 January 1995). 1995.

OPTIMIZATION OF SOIL RECLAMATION ON OPEN-CUST MINES USING SIMULATION MODEL OF SOIL ORGANIC MATTER DYNAMICS ROMUL

© 2009 M.A. Nadporozhskaya¹, E.V. Abakumov¹, O.G. Cherotv²

¹ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia;
e-mail: biosoil.bio.pu.ru

² University of Applied Sci., Bingen, Germany;
e-mail:chertov@fh-bingen.de

As showed by our simulation experiments with mathematical model ROMUL the most effective reclamation of open-cust mines nontoxic loam would be in artificial restoration of soil organic matter system and plant cover (grasses and spruce seedlings). The optimal doses of peat used for reclamation were estimated.

Key words: *reclamation of open-cust mines, soil organic matter, mathematical simulation model.*