

## БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ УГЛЕРОДА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЦЕНТРА ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ И ЕГО ТЕХНОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ\*

А.С. Комаров, И.В. Припутина, А.В. Михайлов,  
О.Г. Чертов

*“Растительность суши, как полагают, может производить значительно большее количество биопродукции при некотором увеличении концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере и при обеспеченности влагой, светом и минеральным питанием. Можно думать поэтому, что появление в атмосфере планеты углекислого газа антропогенного происхождения должно увеличить интенсивность фотосинтеза, биомассу растений и ежегодные приросты органического вещества на планете. Естественно ожидать, что это должно увеличить биомассу животных, а также запасы углерода в почвах и донных осадках в форме гумуса и сапропелей.*

*Предположения о возможном или даже начавшемся увеличении годового прироста биомассы (и связывания тем самым антропогенной двуокиси углерода) на 5–7–10% уже высказывались (Peterson, 1969; Герасимов, 1971). Но пока объективных данных в пользу такого мнения нет. Увеличение продуктивности биомассы на 5–10% требует не только углекислоты, но и влаги, и плодородных почв, и новых сортов растений”.*

Ковда В.А. Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком. Материалы VII Пленума СКОПЕ. М., Наука. 1975. С. 39.

**Введение.** Как теперь известно, процессы изменения биогеохимического цикла углерода, о которых в середине 70-х годов XX века упоминалось как о потенциально возможных, в настоящее время стали реальностью. Результаты исследований по оценке продуктивности лесов Европы выявили достоверное увеличение (до 50%) ежегодного прироста биомассы лесных экосистем в последние 25–30 лет (Spiecker et al., 1996). Эти изменения связаны с комплексом факторов, важнейшими из которых признаны глобальное потепление климата вследствие парникового эффекта и увеличение “питательного статуса” почв за счет возросшей во второй половине XX века промышленной эмиссии окислов азота, что обусловлено высокой сопряженностью биогеохимических циклов углерода и азота в бореальных лесах (Федорец, Бахмет, 2003; Karjalainen, Schuck, 2005). Рост биопродуктивности лесных экосистем определяет увеличение интенсивности депонирования углерода в органическом веществе растительности и почв и рассматривается в настоящее время как позитивный процесс, направленный, в частности, на снижение концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Однако есть данные, свидетельствующие о том, что повышение продуктивности лесов сопровождается ухудшением качества древесины, снижением зольности органического вещества (Spiecker et al., 1996). Кроме того, наряду с эвтрофирующими эффектами,

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН “Изменения природной среды и климата: природные катастрофы”, РФФИ и Минпромнауки Московской области, грант № 04-05-97221 Подмосковье, гранта РФФИ № 05-04-49284, а также гранта ИНТАС 2001-0633.

дополнительное поступление азота с атмосферными выпадениями вызывает увеличение кислотности почв (влияющее, в том числе, на состав почвенного гумуса), снижает биоразнообразие лесных экосистем и может вести к загрязнению почвенно-грунтовых вод нитратами (Wright et al., 1995; Callesen et al., 1999; и др.). Таким образом, "...хозяйственная деятельность современного человеческого общества... вносит значительные количественные и качественные изменения в биогеохимические циклы элементов в биосфере, поставив под угрозу ее бесперебойное функционирование.." (Цит. по: Ковда В.А. Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком: Материалы VII Пленума СКОПЕ. М.: Наука, 1975. С. 9).

В этой связи важное значение приобретают исследования, направленные на сопряженный анализ возникающих в экосистемах количественных изменений в биогеохимических циклах элементов, обусловленных различными видами техногенных воздействий, что может быть использовано для определения параметров допустимых уровней антропогенных нагрузок. В нашей работе на примере сосновых лесов центра Европейской России сделана попытка оценить изменения пулов углерода и азота в компонентах лесных экосистем вследствие существующей лесохозяйственной практики (рубки) и атмосферного загрязнения (повышенного поступления азота с атмосферными выпадениями). Именно эти виды антропогенного воздействия определяют в последние годы основную техногенную нагрузку, характерную для лесных территорий Европейской части РФ (Государственный доклад, 1999). И они же в наибольшей степени изменяют сложившиеся в лесных экосистемах биогеохимические циклы основных элементов.

Проведение подобных исследований возможно на основе данных математического моделирования, которое в последние годы активно применяется для решения подобных задач, см. например, проект RECOGNITION (Karjalainen, Schuck, 2005). В нашем исследовании моделирование динамики углерода и азота в лесах Южного Подмосковья проведено с привлечением системы моделей EFIMOD2, разработанной коллективом сотрудников лаборатории моделирования экосистем ИФХиБПП РАН и лаборатории биохимии почв БиНИИ Санкт-Петербургского государственного университета и предназначенной для исследований биологического круговорота углерода и азота в системе "лес-почва" при различных сценариях изменения внешних условий и лесохозяйственных мероприятий.

**Объекты и методы.** Расчеты, результаты которых обсуждаются в статье, выполнены для участка Данковского лесничества, входящего в опытное лесное хозяйство "Русский лес", расположенное в Южном Подмосковье на левобережье Оки. Модельная территория, представляющая собой совокупность разновозрастных лесов (преимущественно 40–60 лет), включает 104 выдела и занимает площадь 273,4 га. Выбранный участок типичен для подзоны хвойно-широколиственных лесов. В *древостоях* преобладает сосна (*Pinus silvestris* L.), другие породы представлены березой (*Betula pendula* L.), осинкой (*Populus tremula* L.), елью (*Picea abies* L. Karst.), дубом (*Quercus robur* L.) и липой (*Tilia cordata* L.). Данный видовой состав лесов в центре Европейской части России является результатом сильных антропогенных воздействий (распашки, гари, многократных рубок), характерных для этой территории на протяжении последнего тысячелетия (Смирнова, 2004). Лесные эко-

системы модельного участка представлены преимущественно средневозрастными лесами II класса бонитета, которые сформировались в результате специальных лесохозяйственных мероприятий (посадок лесных культур и рубок ухода). Согласно результатам лесоустройства 1990 года, данные которого были взяты нами в качестве исходных для модельных прогонов, преобладающие типы леса – сосняки брусничные (занимают около 40% рассматриваемой площади) и сосняки сложные мелкотравные (около 30%). Пространственная привязка лесотаксационных выделов, для которых проведено моделирование, и визуализация результатов расчетов выполнены на основе программной системы интерактивной визуализации CommonGIS, любезно предоставленной его авторами (Andrienko et al., 2002).

*Почвенный покров* территории представлен зональными дерново-слабо- и среднеподзолистыми почвами преимущественно легкосуглинистого, супесчаного и песчаного гранулометрического состава, сформировавшимися на моренных и покровных суглинках и аллювиальных отложениях террас реки Оки (Экологический мониторинг, 1989). Данные почвы характеризуются преимущественно кислой и слабокислой реакцией почвенных растворов ( $pH_{\text{сол.}}$  4,2–6,3) и имеют пониженное содержание органического вещества (доля углерода в гумусовых горизонтах 0,6–2,3%). Почвы обеднены основными катионами и большинством микроэлементов. Известно, что уровень концентрации азота в почвах подвержен колебаниям и зависит от многих факторов, что затрудняет его изучение, и особенно, в почвах под лесом. Общее содержание азота в исследуемых почвах по нашим данным составляет в среднем 150–200 мг/100 г, концентрация нитратов в верхнем гумусовом слое в середине вегетационного периода может достигать 1,0–2,5 мг/100 г (Припутина, 1996), что несколько выше, чем в аналогичных типах лесов Карелии (Федорец, Бахмет, 2003), и может быть связано с более высокими уровнями атмосферной поставки соединений азота именно в данной форме. Содержание аммонийного азота сопоставимо или ниже концентраций нитратных соединений.

Традиционно в лесотаксационных описаниях для характеристики условий произрастания древостоев используется классификация, основанная на типах условий местообитаний (ТУМ) (Погребняк, 1955). Согласно этой номенклатуре, на данной территории преобладают свежие боры и субори (табл. 1).

*Поступление азота с атмосферными выпадениями.* Возросшая во второй половине XX века промышленная эмиссия окислов азота привела к

Таблица 1

**Распределение ТУМов на модельной территории**

Влажность	Число выделов (% общей площади модельного участка)		
	А – боры	В – субори	С – сложные субори
1 – сухое	1 (0,96%)	0 (0%)	0 (0%)
2 – свежее	43 (41,35%)	38 (36,54%)	8 (7,69%)
3 – влажное	0 (0%)	9 (8,65%)	1 (0,96%)
4 – сырое	0 (0%)	0 (0%)	4 (3,85%)

качественному и количественному перераспределению потоков азота в экосистемах, став причиной экологических нарушений во многих регионах (Nihlgard, 1985; Pedersen, Bille-Hansen, 1995). Еще в 50–60-х годах основной формой минеральных соединений азота, поступающих в наземные экосистемы Европейской части России с атмосферными выпадениями, был аммиачный азот при уровнях суммарного поступления не более 0,5–1,0 кг N/га (Арефьева, 1964). В настоящее время, по данным Росгидромета (Государственный доклад, 1999), атмотехногенная нагрузка азота в наиболее экологически чистых районах на территории Европейской части России составляет 1,5–2,0 кг N/га, а средние фоновые показатели для Центрального экономического района – 2,5–7,0 кг N/га. Рассматриваемый нами участок Данковского лесничества расположен между двумя крупными промышленными агломерациями (Московской и Тульской), что определяет более высокий уровень загрязнения воздуха диоксидом азота и аммиаком. По результатам мониторинговых исследований (Припутина и др., 1993), поставка аммонийного азота на эту территорию составляла 1,0–1,5 кг N/га, нитратного – до 10–12,5 кг N/га. Таким образом, суммарная нагрузка равна 11–14 кг N/га.

Для сценариев оценки влияния азотной нагрузки на продуктивность и перераспределение пулов C и N в рассматриваемых экосистемах нами были выбраны два уровня поступления соединений азота – 6 и 12 кг/га, что соответствует средним показателям, определяемым для лесных территорий центра Европейской части РФ (Holland et al., 2004).

*Формулировка модели.* Основная версия модели EFIMOD2 основана на следующих допущениях:

- индивидуально-ориентированная модель с точными позициями деревьев, то есть имитируемый древостой расположен в ячейках квадратной решетки, клетки которой достаточно малы (0,5 × 0,5 м), чтобы содержать более одного дерева;

- каждое дерево состоит из пяти компонентов (ствол, ветви, листья/хвоя, толстые корни, тонкие корни) и обладает своей собственной зоной питания, зависящей от возраста;

- каждое дерево взаимодействует со множеством ближайших деревьев посредством а) затенения и б) корневой конкуренции за доступный азот из почвы; прирост дерева зависит от ресурса, находящегося в дефиците (поглощенная радиация или доступный азот);

- вследствие стохастического характера входных погодных и почвенных характеристик, включенных в модель, а также случайности начального размещения деревьев в начале моделирования предусмотрена возможность оценки выходных параметров методом Монте-Карло (Ермаков, Михайлов, 1976);

- модель описывает круговорот углерода и азота в системе “древостой–почва”, включая динамику органического вещества почвы;

- модель позволяет использовать в качестве входных характеристик данные лесной таксации.

Модель динамики органического вещества почвы ROMUL, сопряженная с моделью роста отдельных деревьев через поступающий опад, основана на следующих основных допущениях:

- разложение органического вещества происходит в результате сукцессионных изменений комплексов организмов-деструкторов, соответствующим

щих используемым в лесном почвоведении типам гумуса – “грубый гумус”, “модер” и “мулль”;

- видовой состав и число организмов-деструкторов зависят от температуры и влажности почвы и/или подстилки, содержания азота и зольности когорты напочвенного (или внутрпочвенного) опада;

- скорость минерализации элементов происходит со скоростью минерализации органического вещества, за исключением кинетики азота, которая происходит значительно медленнее и обладает рядом специфических особенностей;

- минерализованный азот полностью потребляется растениями, избыточный азот иммобилизуется в органическом веществе почвы.

Анализ чувствительности и верификация модели ROMUL описаны в (Chertov et al., 2001).

Входные параметры системы моделей:

- для каждого вида и возрастной когорты (элемента леса) в каждом древостое – средние диаметр и высота, сумма площадей сечений, запас, число деревьев на гектар;

- пулы углерода и азота лесной подстилки и почвы, включая древесные остатки;

- среднемесячные температура воздуха и осадки; гидрологические параметры почвы;

- тип рубок, возраст рубок.

Все данные по элементам леса берутся из данных по лесоустойству. Связь с почвенными данными более сложная и требует специальной процедуры калибрации. В основе привязки данных лежит понятие типов леса, для которых почвенные пулы углерода и азота либо могут быть оценены из опубликованных данных, либо могут быть оценены с помощью ряда предположений о месте данного типа леса в сукцессионном ряду растительности.

Выходные параметры системы моделей:

- для каждого вида и возрастной когорты (элемента леса) в каждом древостое – средние диаметр и высота, сумма площадей сечений, запас, число деревьев на гектар;

- биомасса, углерод и азот в каждом дереве и напочвенном покрове;

- углерод и азот почвы, включая древесные остатки;

- биомасса, углерод и азот вырубленной древесины.

Анализ системы моделей EFIMOD 2 в целом показал, что она чувствительна к следующим параметрам (Chertov et al., 1997; Komarov et al., 2003):

- температуре воздуха;

- поступлению азота из атмосферы;

- видоспецифическому потреблению азота для прироста;

- содержанию органического вещества и азота в почве.

Для функционирования почвенного блока был разработан специальный имитатор почвенного климата с месячным шагом – SCLISS (Быховец, Комаров, 2002).

Полные описания версий модели EFIMOD и модели динамики органического вещества почвы ROMUL опубликованы в ряде статей (Комаров, Чертов, 2001; Комаров и др., 2001; Чертов, Комаров, 1996; Chertov, Komarov, 1997a,b; Chertov et al., 1999a,b; Chertov et al., 2001; Komarov et al., 2002). Суще-

ственной особенностью данной системы моделей является возможность совместного рассмотрения динамики древостоя и пулов органического вещества в почве. Последние условно разделены на лабильный гумус, стабильный гумус, а также органическое вещество лесной подстилки, являющейся непосредственным источником поступления органики на поверхность почвы. Используемый в модели способ простого описания роста дерева с помощью экологических характеристик, так называемых “сильвиков” (silvics), включающих в себя взаимоотношения между деревом и почвой, был предложен О.Г. Чертовым (1983а, б; Chertov et al., 1999а, б). “Сильвики” описывают видоспецифические характеристики роста и развития дерева. Формализация таких параметров стала возможной на основе данных по биологической продуктивности и эколого-физиологическим характеристикам растений, наиболее важными из которых являются

1) биологическая продуктивность листвы/хвои,  $\alpha_{\max}$ , [грамм биологической продуктивности (прирост биомассы) на грамм листвы/хвои в год];

2) удельное потребление элементов почвенного питания  $n_p$  (грамм элемента, необходимый для продукции грамма прироста в год);

3) перераспределение полного прироста биомассы дерева в приросты его компонентов – ствола, хвои/листвы, ветвей, толстых корней и тонких корней; это перераспределение зависит от этапа развития дерева (молодые – прегенеративные, взрослые – генеративные и старые – постгенеративные) и может быть описано соответствующими правилами;

4) фракции ежегодных опадов компонентов дерева, поступающие на почву.

Содержание азота и зольность фракций опада играют важную роль для оценки динамики органического вещества почвы с помощью модели ROMUL. В модели также учтена реутилизация азота из опадающих листьев и хвои (Работнов, 1980). Потенциальный годичный прирост отдельного дерева определяется как максимально возможный для данного местообитания прирост, который может быть произведен единицей массы хвои/листвы. Затем он редуцируется в зависимости от освещенности данного дерева или количества доступного азота, собранного с его площади питания. Выбор производится по принципу Либиха, то есть выбирается минимальное значение из двух возможных (лимитируемое либо по свету, либо по обеспеченности азотом), и затем полученная величина перераспределяется между частями дерева.

Опад различных частей дерева поступает на поверхность почвы и его дальнейшая трансформация описывается моделью ROMUL, которая учитывает процессы минерализации и гумификации опада, которые, в том числе, ведут к образованию и эмиссии из почвы углекислого газа и образованию минеральных форм азота. Влияние климатических факторов (температуры и влажности лесной подстилки и собственно почвы) на эти процессы учитывается в модели ROMUL на основе использования генератора почвенного климата SCLISS, который позволяет имитировать среднемесячные показатели данных параметров.

Если отношение листвы/хвои к полной биомассе дерева становится ниже определенного предела, то считается, что дерево отмирает; при

этом все его составляющие поступают в/на почву. По полной биомассе вычисляются дендрометрические характеристики дерева: высота, диаметр, запас стволовой древесины. При этом учитываются и некоторые адаптационные механизмы: при лимитировании по свету высота ствола имеет больший прирост, чем при лимитировании по азоту, когда больше прирастает диаметр, также корректируются и прирост листвы/хвои и тонких корней.

Основными источниками неопределенностей при различных приложениях модели являются правила распределения прироста, начальные данные по почвенным пулам углерода и азота и скорость минерализации гумуса.

*Характеристика сценариев лесопользования.* Для оценки влияния типа хозяйствования на динамику древостоев и параметры циклов углерода и азота в экосистемах рассматривались четыре сценария ведения лесного хозяйства для временного периода 200 лет. Как уже отмечалось, начальные характеристики моделирования (в том числе возрастной и видовой состав лесотоксационных выделов) соответствуют данным за 1990 год.

Сценарий А характеризует естественное развитие лесных экосистем – без рубок. Возобновление имитировалось с интервалом 30 лет (4000 деревьев на гектар) породами смешанного состава. Состав зависит от типа условий произрастания. ТУМы А1, А2: 30% сосна, 70% береза; В2, В3, С2, С3, С4: 10% сосна, 25% ель, 30% береза, 20% дуб, 15% липа.

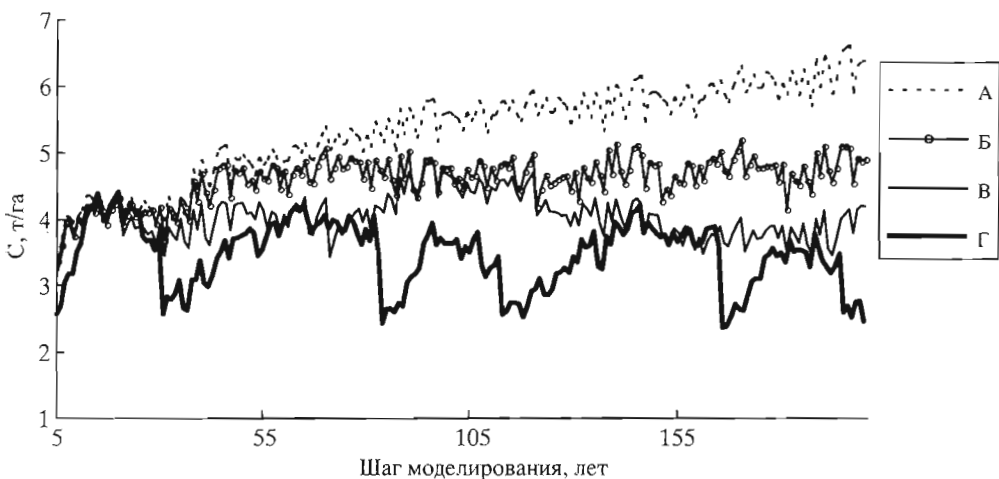
Сценарий Б предполагает две рубки ухода и затем следуют выборочные рубки каждые 30 лет в разновозрастном лесу с выборкой каждый раз 30% суммы площадей сечения деревьев в древостое. Порубочные остатки остаются на территории. Как показывает практика лесопользования, в этом случае происходит успешное возобновление основных видов деревьев. Данный сценарий близок к системе выборочных рубок, распространенных в Германии.

Сценарий В отражает систему рубок, принятую в России, и включает четыре рубки ухода и рубку главного пользования, время которой зависит от возраста главной породы. Рубка главного пользования сплошная, порубочные остатки сжигаются. Как правило, происходит успешное возобновление основных видов деревьев.

Сценарий Г включает одну рубку промежуточного пользования по верховому методу (вырубается до 50% по сумме площадей сечений) и рубку главного пользования без сохранения естественного возобновления, порубочные остатки сжигаются. Этот сценарий имеет общие черты со скандинавской системой рубок и соответствует отечественной практике несанкционированных рубок.

При моделировании и последующем анализе динамики исследуемых показателей не учитывалось влияние ветровалов, болезней, повреждения древостоев скотом и насекомыми, или вероятность возникновения пожаров.

**Результаты и дискуссия.** Баланс биогенных элементов в лесных экосистемах во многом зависит именно от способов ведения лесного хозяйства. Рубки ведут к уменьшению общих запасов органического вещества в экосистемах не только в связи с изъятием древесины, но и за счет усиленной



**Рис. 1.** Динамика первичной годичной продуктивности (NPP), выраженная в углероде при разных сценариях лесопользования. А, Б, В, Г – сценарии лесопользования.

минерализации почвенной органики в первые годы после рубок. Таким образом нарушается естественное соотношение приходной и расходной статей баланса углерода и сопряженных с ним элементов, прежде всего азота.

Первичная *продуктивность* древостоев (NPP), как известно, является одним из основных параметров масс-баланса углерода, определяющих интенсивность его поступления в лесные экосистемы, а также интенсивность вовлечения в биологический круговорот других элементов. Вследствие разновозрастности и разного видового состава биогеоценозов на начальном этапе моделирования динамика NPP отдельных выделов за 200-летний период изменяется в широком диапазоне величин, составляя в среднем для модельной территории 3–6 т С/га при условии атмосферной поставки азота на уровне 6 кг/га (рис. 1). В случае естественного развития лесов их продуктивность со временем возрастает до 1,5 раз. В соответствии со спецификой рубок – частичное или полное изъятие наземной части биомассы древостоев – уменьшается и величина NPP для отдельных выделов. Региональный же показатель средней продуктивности, по которому можно судить о параметрах ежегодной аккумуляции (стоке) углерода в лесах Южного Подмосковья, при выборочных (сценарий Б) и нормативных (сценарий В) рубках сохраняется примерно на одном уровне (около 4 т С/га) в течение всего периода моделирования. Сценарий Г, имитирующий скандинавскую систему, выявил несколько периодов резкого снижения продуктивности лесных экосистем с последующим постепенным восстановлением NPP до уровня, предшествующего массовым рубкам. Отмеченное в модельном эксперименте резкое падение продуктивности, как правило, не учитывается при проведении региональных оценок стока углерода в лесных экосистемах, поскольку для подобных задач обычно используются показатели потенциальной продуктивности лесов.



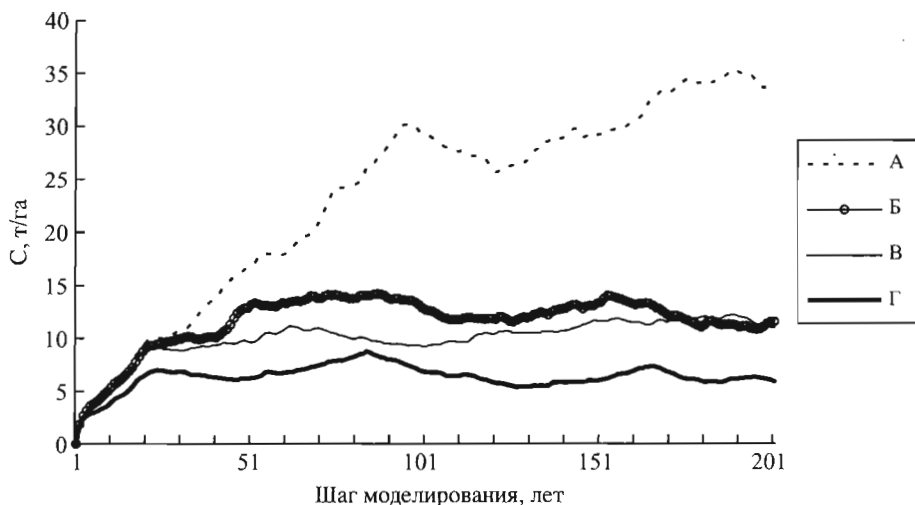
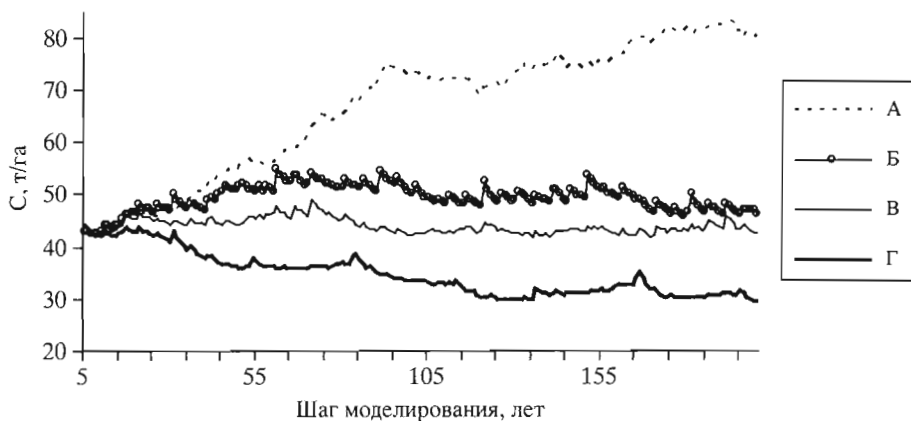


Рис. 2. Динамика углерода в сухостое. А, Б, В, Г – сценарии.

Таким образом, на наш взгляд, возможно завышение приходной статьи баланса углерода.

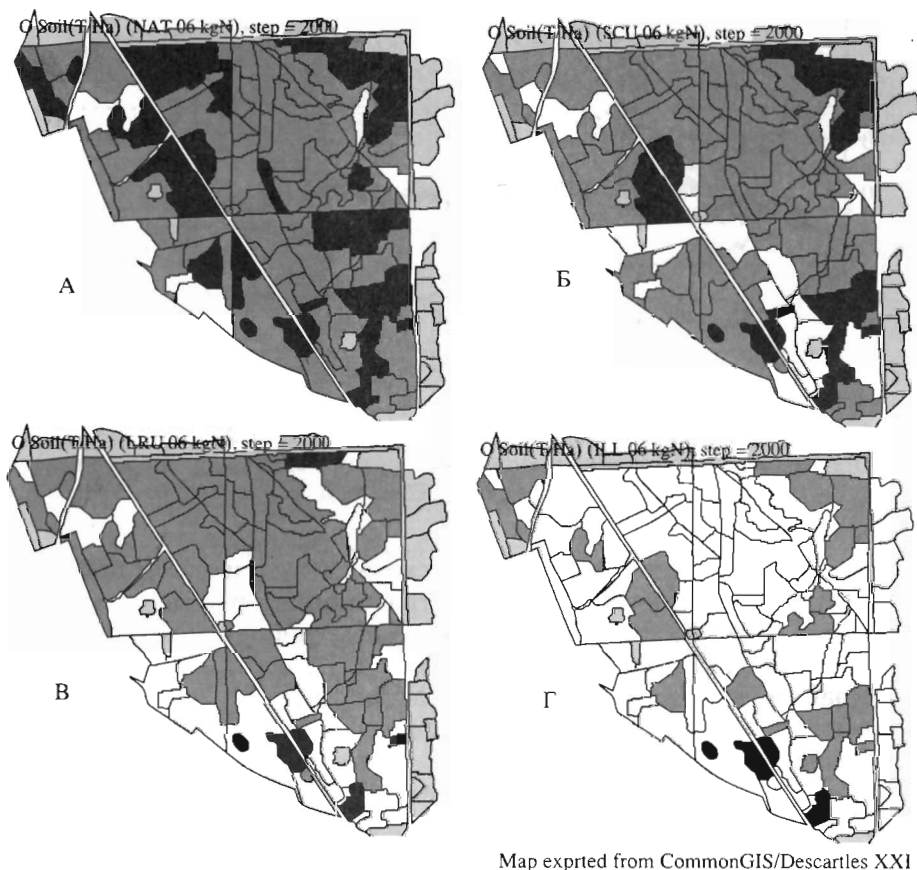
Специфичным пулом углерода в лесных экосистемах, который редко включается в балансовые оценки, является *органическое вещество сухостоя и валежа* – отмершей, но слабо трансформированной по химическому составу части древесины. В модели EFIMOD2 эти категории имитируются как часть древесного отпада со сравнительно медленной скоростью минерализации, что определяет относительно долговременное закрепление в ней элементов, и при краткосрочных прогнозах может рассматриваться как сток углерода. На рис. 2 представлена динамика средних показателей накопления углерода в сухостое и валеже. Поскольку количественные данные по этому показателю в лесотоксационных описаниях, как правило, отсутствуют, на начальном этапе моделирования для всех сценариев запасы углерода приняты равными нулю. По нашим данным, за 200 лет при развитии лесов без рубок в данном пуле органического вещества лесных экосистем может быть закреплено до 35 т С/га, что составляет около 3% общего количества углерода, аккумулированного в древесине. Накопление происходит относительно равномерно в течение всего периода моделирования. Естественно, что, с точки зрения товарного лесного хозяйства, сухостой и валеж рассматриваются как потери древесины. При любых сценариях рубок стволы удаляются с лесосеки, и в целом для территории лесничеств количество сухостоя значительно сокращается. Как свидетельствуют результаты моделирования для подмосковных лесов, общие запасы углерода в этом случае не превышают 10–12 т/га, и эта величина практически не меняется со временем. Наличие сухостоя в значительной степени определяет биоразнообразие лесов, поскольку является средообразующим фактором для многочисленной флоры и фауны почвенных деструкторов. Таким образом, существующие виды практики управления лесами нарушают связи, сложившиеся при естественном развитии лесов, как количественно, так и качественно.



**Рис. 3.** Динамика запасов углерода почвы при разных сценариях лесопользования (А, Б, В, Г).

Не менее сложные изменения происходят и в почвенном покрове лесов, органическое вещество которого традиционно рассматривается как резервуар долговременного депонирования углерода. Первоначальные запасы углерода в почвах выделов оценивались в соответствии с параметрами, характерными для выделенных ТУМов. Для большинства выделов, включенных в анализ, запасы углерода в почвах (включая подстилку) на начальном шаге моделирования были приняты равными 35–50 т С/га (в расчете на слой 0–100 см). Согласно полученным результатам, за 200-летний период естественного развития лесов количество углерода, накопленного в почвах, возросло почти в 2 раза, составив в среднем около 80 т С/га. Как показывают данные, представленные на рис. 3, в сценариях выборочных (Б) и нормативных (В) рубок средний уровень запасов углерода в почвах практически не меняется со временем, тогда как практика нелегальных рубок (Г) ведет к заметным потерям почвенного органического вещества. Как следствие, в этом случае запасы углерода на большей части модельной территории сокращаются в среднем в 1,5 раза (рис. 4). Модельные расчеты подтверждают устойчивость к техногенным воздействиям, так называемого, “стабильного гумуса” (полностью гумифицированный материал, связанный с глинистыми минералами или полуторными окислами), тогда как доля фракций “лабильного гумуса” (комплекс гумусовых веществ, происходящий из внутрипочвенной когорты опада) заметно сокращается. В пересчете на углерод, в сценариях Б и В, по нашим оценкам, происходит двукратное снижение запасов, а в сценарии Г – снижение в 4–5 раз. Аналогичные соотношения характерны и для динамики запасов углерода в подстилках.

Проведенные расчеты основных потоков углерода позволили оценить региональные параметры масс-баланса данного элемента для исследуемой территории. По нашим данным, при разных сценариях использования сосновые леса Подмоскovie ежегодно связывают в составе биомассы древостоев от 3,3–3,5 (несанкционированная практика) до 5,0–5,5 (естественное развитие) тонн углерода на гектар, что определяет показатели приходной статьи



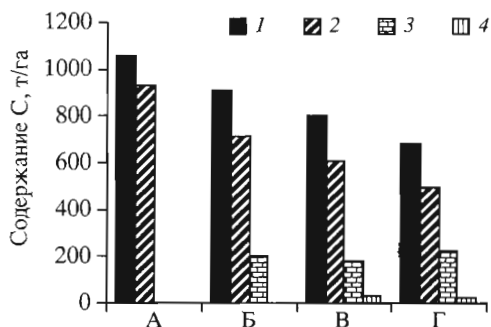
Map exptred from CommonGIS/Descartles XXI

**Рис. 4.** Запасы углерода в почвах выделов при разных сценариях лесопользования (А, Б, В, Г) на 200-й год моделирования. Белый цвет – менее 30 т С/га; темно-серый – от 30 т С/га до 80 т С/га; черный – более 80 т С/га.

баланса (рис. 5). Наибольшая “расходная” часть во всех рассматриваемых экосистемах связана с *эмиссией*  $\text{CO}_2$ , параметры которой пропорциональны показателям нетто-продуктивности лесных биогеоценозов и ниже “приходной” части на 10–25%, составляя от 2,5–3,0 (сценарий Г) до 4,5–4,7 (сценарий А) т С/га. Соотношение пулов углерода, связанных с процессами фотосинтеза (продукция биомассы) и почвенного дыхания (эмиссия  $\text{CO}_2$ ), минимально в лесах естественного развития. Как показывают расчеты, при рубках общее сокращение объемов углерода, возвращаемого в атмосферу в окисной форме, сопровождается снижением доли данного пула в расходной частей углеродного цикла. Объемы выноса биомассы *в результате рубок* суммарно за весь период моделирования в пересчете на углерод составляют 265,5, 235,3 и 208,6 т С/га (сценарии Г, Б и В), что соответствует ежегодным потерям около 1 т С/га. Таким образом, рубки “выводят” из экосистем от 20–25 до 35–40% создаваемого органического вещества. Кроме того, в случае *сжигания порубочных остатков* дополнительно “теряется” ежегодно 175–235 кг С/га (или суммарно 35,3–46,9 т С/га в зависимости от типа сценария).

**Рис. 5.** Соотношение приходной и расходной статей баланса углерода при разных сценариях лесопользования (суммарно за 200 лет):

1 – первичная продуктивность; 2 – эмиссия  $\text{CO}_2$ ; 3 – вывезенный углерод вместе с заготовкой древесины; 4 – сжигание порубочных остатков.



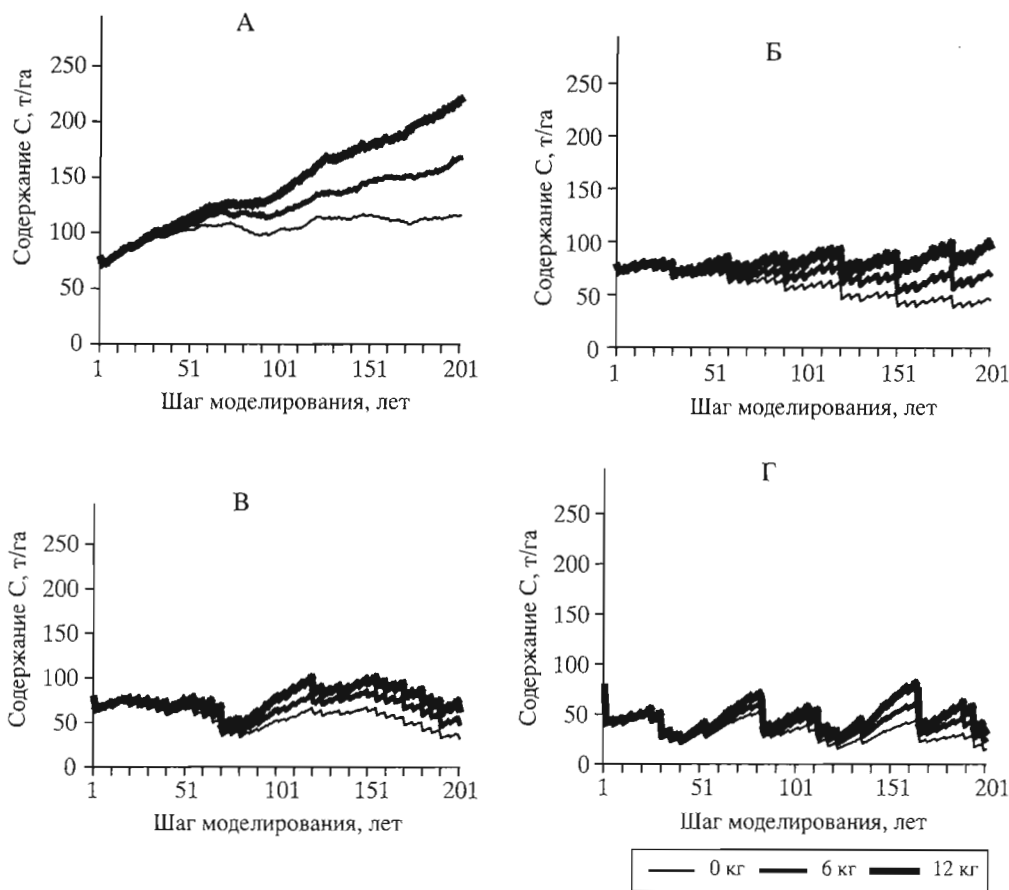
Как следствие, только для лесов естественного развития рассчитанное соотношение потоков (баланс) углерода положительно и может составить 125–130 т С/га за 200-летний период. При любом из вариантов хозяйственного использования изъятие углерода с древесиной в рассматриваемых нами лесах не компенсируется созданием новой биомассы; наибольшие потери характерны для практики сплошных рубок.

Нами было рассмотрено влияние другого техногенного фактора – *выпадения азота* – на изменение баланса углерода. Как правило, сосновые леса на песчаных и супесчаных почвах дефицитны по азоту, поэтому его дополнительное поступление, как показывают наблюдения, практически полностью “перехватывается” экосистемой и используется для создания биомассы (Федорец, Бахмет, 2003; Wright et al., 1995).

В условиях, соответствующих, по нашим представлениям, доиндустриальному уровню поступления азота, в сосновых лесах при их естественном развитии увеличение запасов древесины за 200-летний период не превышает 15–20 т С/га по сравнению с первоначальным уровнем (рис. 6). При наличии дополнительного источника питания в виде азота атмосферных выпадений, начиная с 30–50 года моделирования, становится заметной различие в приростах и, соответственно, запасах углерода в древесине. Суммарно за 200 лет прибавка может составить 35–50 т С/га при увеличении уровня выпадений азота на 6 кг/га, что соответствует повышению первоначальных параметров продуктивности на 30–35%.

Рубки, ведущие к изъятию древесины и общему снижению продуктивности лесов, до определенной степени нивелируют эффект прибавки азотного питания. На конечном шаге моделирования при сценарии выборочных (Б) и нормативных (В) рубок ежегодные выпадения 6 кг N/га “компенсируют” снижение продуктивности вследствие рубок и позволяют поддержать запасы углерода в биомассе практически на первоначальном уровне. В то же время эффект от ежегодной прибавки в 12 кг N/га ведет к некоторому увеличению запасов только в сценарии Б. Сценарий Г даже при уровнях выпадения азота выше 12 кг/га в итоге демонстрирует сокращение запасов углерода в древесине.

Анализ параметров, характеризующих сохранение и (или) накопление углерода в почвенном органическом веществе при разных сценариях лесопользования и уровнях атмосферной поставки соединений азота показывает, что в лесах естественного развития при поступлении 6 кг N/га дополнительная аккумуляция почвенного органического вещества за 200-летний период



**Рис. 6.** Динамика углерода в древостоях при различных ежегодных уровнях выпадений азота. А, Б, В, Г – сценарии лесопользования, 0, 6, 12 кг – уровни выпадения азота в год на гектар.

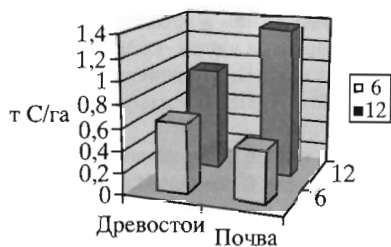
может составить около 15–20 т С/га. В сценариях с рубками (Б и В) азотные выпадения при уровне 6 кг N/га компенсируют потери углерода почвы, связанные с изъятием биомассы древесины. В сценарии Г для сохранения почвенного пула углерода требуется ежегодное поступление около 12 кг N/га.

В отношении *баланса азота*, модель предсказывает увеличение его суммарных запасов в экосистемах сосновых лесов как отклик на повышенное поступление с атмосферными выпадениями (рис. 7). При естественном развитии лесов и уровне выпадений, равном 6 кг N/га, за 200-летний период в экосистемах может дополнительно аккумулироваться около 1 т N/га. Атмосферной поставки в 6 кг N/га достаточно для поддержания положительного баланса азота в сценариях выборочных и нормативных рубок, притом что в результате изъятия древесины происходит вынос азота из экосистем, оцениваемый нами ориентировочно в 550–650 кг N/га. В случае, когда используется практика нелегальных рубок (сценарий Г), поддержание положительного баланса соединений азота в экосистемах возможно при более высоких уровнях

атмосферных выпадений, чтобы компенсировать потери 700–800 кг N/га, удаляемого с древесиной.

Анализ перераспределения пулов азота между биомассой древостоев и почвой показывает, что в лесах естественного развития при уровне азотной нагрузки, равной 6 кг/га, большая часть азота, поступившего в экосистемы, “закрепляется” в растительности, опад которой со временем пополняет и почвенный пул (см. рис. 7). В то же время, при увеличении азотной нагрузки до 12 кг/га это соотношение меняется. Результаты модельных расчетов

**Рис. 7.** Соотношение параметров перераспределения азота между почвенным и растительным блоками экосистем при разных уровнях азотной нагрузки.



свидетельствуют, что в этом случае в биомассе древостоев удерживается меньшая часть из поступившего в экосистемы суммарного азота. Больше количество приходится на почвенный пул. Однако выявленное увеличение содержания азота в почвах не рассматривается нами как показатель непосредственного накопления азота в почвенном блоке. Как известно, биогеохимический цикл азота включает целый комплекс сложных процессов внутрипочвенной трансформации его соединений, которые пока в рамках этой модели не описаны количественно. Среди них и процессы образования закиси азота и вымывание нитратов, определяющие основные потери почвенного азота. Более вероятно, что реальные параметры “закрепления” азота в рассматриваемых нами почвах ниже рассчитанного уровня. Однако, на наш взгляд, модель достоверно отражает общую картину перераспределения потоков азота в системе “почва–растительность” при разных уровнях азотной нагрузки.

**Заключение.** Приведенные в статье результаты модельных расчетов баланса углерода в лесных экосистемах, выполненных на примере сосновых лесов Подмосковья, носят предварительный характер. Тем не менее, они позволяют судить об основных параметрах и особенностях трансформации биогеохимического цикла углерода в условиях, происходящих в последние десятилетия техногенных воздействий на лесные территории. Полученные данные подтверждают взаимосвязь биогеохимических циклов углерода и азота и свидетельствуют о необходимости их сопряженного анализа, что может быть использовано для разработки сценариев оптимального природопользования. Более детальное совместное рассмотрение этих циклов может быть проведено после включения в модель дополнительных составляющих азотного цикла, упоминавшихся в тексте.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арефьева З.Н., Колесников Б.П.* Динамика аммиачного и нитратного азота в лесных почвах при высоких и низких температурах // Почвоведение. 1964. № 3. С. 30–45.
- Быховец С.С., Комаров А.С.* Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение. 2002. № 4. С. 443–452.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды в Российской Федерации. М., 1999. 212 с.
- Ермаков С.М., Михайлов Г.А.* Курс статистического моделирования. Новосибирск: Наука, 1976.
- Казимиров Н.И., Куликова В.К., Новицкая Ю.Е.* Лесоводственная эффективность минеральных удобрений в лесах Карелии // Применение минеральных удобрений в лесном хозяйстве: Материалы научн.-коорд. совещ. 25–27 марта 1974. Гомель, 1974. С. 27–28.
- Ковда В.А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука. 1985. 265 с.
- Ковда В.А.* Проблемы защиты почвенного покрова и биосферы планеты. Пушино, 1989. 156 с.
- Комаров А.С., Чертов О.Г.* Моделирование циклов углерода и азота в лесных экосистемах // Экология и почвы: Избранные лекции 10-й Всероссийской школы. Пушино, 2001. Т. 4. С. 76–84.
- Комаров А.С., Чертов О.Г., Зудин С.Л., Надпорожская М.А., Михайлов А.В., Быховец С.С., Зудина Е.В., Зубкова Е.В.* Система имитационных моделей продукционных процессов и циклов элементов в лесных экосистемах EFIMOD // Тез. докл. Всерос. научной школы “Математические методы в экологии”. Петрозаводск, 2001. С. 220–222.
- Кудеяров В.Н.* Почвенные источники углекислого газа на территории России // Круговорот углерода на территории России. М., 1999. С. 165–201.
- Погребняк П.С.* Основы лесной типологии. Киев, 1955. 452 с.
- Припутина И.В., Орлинский Д.Б., Башкин В.Н.* Эколого-биогеохимическое районирование Моск. обл. // Биогеохимические основы экологического нормирования. М.: Наука, 1993. С. 24–36.
- Припутина И.В.* Распределение соединений азота в ландшафтах Московской области. Дис. ... канд. геогр. н. М., 1996. 152 с.
- Работнов Т.А.* Азот в наземных биогеоценозах // Структурно-функциональная организация биогеоценозов. М.: Наука, 1980. С. 69–90.
- Смирнова О.В.* (ред.). Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. В 2 кн. // Центр по пробл. Экологии и продуктивности лесов. М.: Наука, 2004. Кн. 1. 479 с.
- Федорец Н.Г., Бахмет О.Н.* Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2003. 240 с.
- Чертов О.Г., Комаров А.С.* Имитационная модель динамики органического вещества почв // Вестн. СПб ун-та. 1996. Сер. 3. Вып. 1. С. 104–109.
- Чертов О.Г.* Математическая модель экосистемы одного растения // Журн. общ. биол. 1983а. Т. 44. С. 406–414.
- Чертов О.Г.* Количественный подход к экологическим параметрам видов на примере сосны (*Pinus sylvestris* L., Pinaceae) // Ботанический журнал. 1983б. Т. 68. С. 1318–1324.
- Экологический мониторинг Серпуховского района. Отчет о работе по договору о научно-техническом сотрудничестве между ИПФС АН СССР и ПТЗ. 1989.
- Andrienko, N., Andrienko G., Voss H., Bernardo F. et al.* Testing the usability of interactive maps in CommonGIS // Cartography and Cartographic Information Science. 2002. V. 29. Iss. 4. P. 325–342.
- Callesen I., Raulund-Rasmussen K Gundersen P., Stryhn H.* Nitrate concentrations in soil solution below Danish forests // Forest Ecology and Management. 1999. V. 114. P. 71–82.
- Chertov O.G., Komarov A.S.* Individual-based tree/soil model of North European forest ecosystems // Materials to XI World Forest Congress. Antalia, Turkey. 1997a. V. 6. P. 126–133.
- Chertov O.G., Komarov A.S.* SOMM: a model of soil organic matter dynamics // Ecological Modelling. 1997b. V. 94. P. 177–189.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Tsiplianovsky A.M.* A combined simulation model of Scots pine, Norway spruce and Silver birch ecosystems in the European boreal zone // Forest Ecology and Management. 1999a. V. 116. P. 189–206.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Tsiplianovsky A.M.* Simulation of soil organic matter and nitrogen

accumulation in Scots pine plantations on bare parent material using forest combined model EFIMOD. *Plant and Soil*. 1999b. V. 213. P. 31–41.

*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 modelling // *Ecological Modelling*. 2001. V. 138. P. 289–308.

*Holland E.A., Braswell B.H., Sulzman J.M., Lamarque J.-F.* Nitrogen Deposition onto the United States and Western Europe. Data set. 2004. Available on-line [<http://www.daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA.

*Karjalainen T., Schuck A.* (eds.) Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe – Results of the RECOGNITION Project. Brill, Köln. N.Y., 2005.

*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*. 2003b. V. 170. P. 373–392.

*Michalzik B., Kalbitz K., Park J.H., Solinger S., Matzner E.* Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen – a synthesis for temperate forests // *Biogeochemistry*. 2001. V. 52. P. 173–205.

*Nihlgård B.* The ammonium hypothesis – an additional explanation to the forest dieback in Europe // *Ambio*. 1985. V. 14. P. 2–8.

*Pedersen L.B., Bill-Hansen J.* Effects of nitrogen load to the forest floor in Sitka spruce stands as affected by difference in deposition and spruce aphid infestation // *Water, Air and Soil Pollution*. 1995. N 85. P. 1173–1178.

*Spiecker H., Mielikäinen K., Köhl M., Skovsgaard J.* (eds.) Growth trends in European forests. Studies from 12 countries. *Europ. Forest Inst. Research Report 5*. Springer Verlag, 1996.

*Wright R.F., Roelofs J.G.M., Bredemeier M., Blanck K. et al.* NITREX: responses of coniferous forest ecosystems to experimentally changed deposition of nitrogen // *Forest Ecology and Management*. 1995. V. 71. P. 163–169.

## **ПРОИСХОЖДЕНИЕ СУЛЬФАТНЫХ СОЛЕЙ В ЛЁССОВЫХ ПОРОДАХ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА И СМЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО ДАННЫМ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА СЕРЫ\***

*Я.Г. Рысков, С.А. Олейник, Е.А. Рыскова, Е.Г. Моргун*

Лёссовый покров представляет собой одно из самых специфических явлений четвертичного периода. Его образование связано с самым холодным периодом фанерозойской истории Земли (Динамика ландшафтных..., 2002). Лёссовые отложения как продукт перигляциальной обстановки характерны для всех ледниковых эпох плейстоцена. Дискуссия об условиях формирования лёссовых толщ имеет более чем полуторавековую историю. В литературе можно встретить высказывания о том, что лёссовый материал может накапливаться различными путями. Однако для лёссов равнинных областей перигляциальной зоны Евразии сейчас уже получены убедительные доказательства того, что основные массивы лёссов, располагающиеся на высоких террасах, сформировались как результат аккумуляции пылеватых частиц, поступающих преимущественно из воздуха (Динамика ландшафтных..., 2002).

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты №№ 03-04-49321, 04-05-65314, 05-05-64487.



УДК 551.2/3  
ББК 40.3  
П65

*Редакционная коллегия:*

доктор биологических наук *В.Н. КУДЕЯРОВ* (отв. редактор),  
доктор биологических наук *В.А. ДЕМКИН*,  
доктор географических наук *И.В. ИВАНОВ*,  
кандидат биологических наук *Т.С. ЛУКОВСКАЯ*

*Рецензенты:*

доктор сельскохозяйственных наук *Б.Н. ЗОЛОТАРЕВА*,  
доктор биологических наук *А.С. КЕРЖЕНЦЕВ*

**Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв** / [отв. ред. В.Н. Кудеяров] ; Ин-т физ.-хим. и биол. проблем почвоведения РАН. – М. : Наука, 2006. – 568 с. – ISBN 5-02-033432-4 (в пер.).

Материалы сборника научных трудов посвящены проблемам пространственно-временной организации и функционирования почв в связи с эволюцией почв под влиянием изменений климата и хозяйственной деятельности человека. Рассмотрены закономерности вековой изменчивости почвенных свойств и процессов, состояние микробных сообществ разновозрастных почв степной зоны Восточной Европы; роль палеокриогенеза в формировании почвенного покрова Восточно-Европейской равнины и создании пространственной неоднородности свойств почв; закономерности оксидогенеза, галогенеза, карбонатообразования в различных физико-химических условиях, обусловленных динамикой климата. В связи с антропогенным воздействием на почвенный покров рассмотрены вопросы биогеохимии тяжелых металлов в системе почва–растение, трансформации органических соединений, влияния многолетнего применения удобрений на питательный режим почв, нарушения микробного сообщества почв. Приведены результаты использования методов математического моделирования для оценки биогеохимических циклов азота, углерода, тяжелых металлов.

Для научных работников, аспирантов, студентов – почвоведов, географов, экологов, агрохимиков и специалистов в других смежных с почвоведением областях знания.

**Soil processes and spatio-temporal organization of soils** / [Ed. by V.N. Kudeyarov] ; Institute of Physico-chemical and Biological Problems in Soil Science RAS. – Moscow : Nauka, 2006. – 568 p. – ISBN 5-02-033432-4 (in cloth).

The scientific papers presented in this collection are devoted to problems of the spatio-temporal organization and functioning of soils in connection with the soil evolution induced by the climatic changes and anthropogenic activity. The regularities of century-long variability of soil properties and processes, the state of microbial communities in soils of a different age in the steppe zone of the East Europe; the role of paleocryogenesis in the forming of soil cover on the East-European Plain and in the space heterogeneity of soil properties; the regularities of oxide-, salt genesis, carbonate formation under different physicochemical conditions induced by the climate dynamics are considered. The biochemistry of heavy metals in the soil-plant system, the transformation of organic compounds, the effect of the long-term application of fertilizers on the nutritious regime of soils, and the changes of microbial community are considered in connection with the anthropogenic impact on soil cover. The results of mathematical modeling are given for the estimation of the biogeochemical cycles of nitrogen, carbon, and heavy metals.

For soil scientists, post-graduates and students majoring in soil science, geography, ecology, agrochemistry, and experts in other natural sciences.

Темплан 2005-И-143

ISBN 5-02-033432-4

© Ин-т физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, 2006  
© Редакционно-издательское оформление.  
Издательство “Наука”, 2006