

УДК: 519.241.6: 519.25: 581.55: 634.948

Применение метода Монте-Карло в оценках допустимых воздействий атмосферных поллютантов на лесные экосистемы

©2012 Припутина И.В.^{*1}, Аверкиева И.Ю.^{**1}, Танканаг А.В.^{***2}

¹Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, 142290, Россия

²Учреждение Российской академии наук Институт биофизики клетки РАН, Пушкино, 142290, Россия

Аннотация: Представлены результаты количественной оценки допустимых параметров воздействия атмосферных поллютантов (подкисляющих и эвтрофирующих соединений азота) на лесные экосистемы Московской области. Расчеты выполнены на основе статической модели биогеохимического масс-баланса с использованием метода Монте-Карло, что позволило учесть существующую естественную вариабильность природных характеристик, отражающих условия произрастания лесов Подмосковья.

Ключевые слова: модели биогеохимического масс-баланса, критические нагрузки, метод Монте-Карло, вариабильные параметры, лесные экосистемы, атмосферные поллютанты.

ВВЕДЕНИЕ

В современной экологии существует необходимость обоснования допустимых параметров воздействий поллютантов на экосистемы с целью минимизации экологических рисков от хозяйственной деятельности человека. Общепризнано, что поведение техногенных соединений и продуктов их трансформации в окружающей среде регулируется особенностями биогеохимических циклов элементов, что позволяет использовать модели биогеохимического масс-баланса для количественной параметризации потоков загрязняющих веществ в экосистемах. Статические и динамические модели масс-баланса достаточно хорошо представлены в литературе [1-5]. Среди них можно отметить геохимически равновесные модели, описывающие квазистационарную ситуацию, при которой входящие и выходящие потоки элементов в экосистемах относительно сбалансированы (уравновешены) за определенный временной интервал (обычно год), что отражает условия развития большинства природных биогеоценозов на относительно коротких отрезках времени (25–50 лет) при отсутствии сильных внешних воздействий [2,6]. Подобные модели позволяют рассчитать максимально допустимый уровень поступления поллютантов в экосистемы, при котором не нарушается соотношение основных миграционных потоков вещества, и сохраняются нормальное функционирование и видовая структура экосистем [7]. Этот экологически обоснованный уровень нагрузок в зарубежной и отечественной литературе принято обозначать термином «критические нагрузки» (далее КН) [6,8].

* v_35_6@rambler.ru,

** averkieva25@rambler.ru

*** tav@icb.psn.ru

Как правило, в качестве входных параметров в моделях масс-баланса используются усредненные значения различных показателей, отражающих характеристики репрезентативных экосистем или природно-территориальных комплексов. Соответственно, рассчитанные результирующие величины КН представляют собой единичные значения [9]. Однако в силу неполноты имеющейся информации о функционировании сложно организованных биологических и биокосных систем и их недостаточной изученности, результаты оценок масс-баланса с использованием средних значений имеют высокий уровень неопределенности. Кроме того, средние показатели не всегда адекватно отражают характерную для природных объектов естественную вариабельность большинства показателей, связанную с их сезонной или межгодовой динамикой, внутривидовыми различиями и пространственной неоднородностью условий среды. Например, имеющиеся данные могут быть представлены ограниченным набором значений и/или не иметь нормального статистического распределения, что делает расчеты среднего арифметического или медианы некорректными. Предлагаются различные подходы к анализу неопределенности и ее минимизации при математическом описании биологических и биокосных систем, в том числе, с использованием теории нечетких множеств и метода Монте-Карло [5,10].

В случае решения уравнений масс-баланса стохастическими методами (например, методом Монте-Карло) для каждого рассматриваемого объекта мы получаем не единственное значение, а вариационный ряд значений КН, который соответствует возможному сочетанию природных условий за выбранный исследователем отрезок времени. Последующий анализ полученной выборки позволяет дать более детальную характеристику исследуемого объекта (или процесса), что повышает практическую значимость проводимых оценок. Так, например, в геохимической экологии и экотоксикологии при разработке экологических нормативов принято, что уровни нагрузок, соответствующие 95%-ной и 5%-ной защищенности популяции, рассматриваются как нижняя и верхняя границы допустимых воздействий поллютантов на живые организмы, а 50%-ный уровень соответствует максимально обоснованной нагрузке [11]. Соответствующие им значения рассчитываются как 5%, 50% и 95% квантили из имеющейся выборки экспериментальных или модельных значений. Аналогично, рациональное природопользование предполагает использование более «строгих» нормативов техногенных нагрузок (на уровне нижней границы допустимых воздействий) для охраняемых территорий (заповедников и т. п.), а для территорий активного хозяйственного использования – менее «строгих».

Примером реализации такого подхода могут быть представленные в данной статье результаты оценки критических нагрузок эвтрофирующих и подкисляющих соединений азота для лесных экосистем Московской области.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

1. В качестве объектов исследования рассмотрены типичные группы лесных биогеоценозов Подмосковья, отражающие существующее сочетание почвенно-геоморфологических, климатических, геоботанических и хозяйственных условий региона. Рассмотрено 10 модельных групп типов леса, краткая характеристика которых дана в табл. 1. В том числе, в отдельную группу выделены хвойно-широколиственные биогеоценозы Приокско-Террасного государственного природного биосферного заповедника (далее ПТЗ), как пример лесных экосистем, имеющих режим особо охраняемых природных территорий.

Таблица 1. Основные природные характеристики модельных групп лесных экосистем Московской области (по данным [12–18])

Номер группы	Лесорастительная характеристика	Почвенные условия	Климатические условия	
			Средне-годовая температура, °С	Осадки, мм в год
1	Сосняки лишайниково-мохово-кустарничковые	Почвы дерново-подзолистые песчано-супесчаные	4,6–4,7	617–630
2	Сосняки лишайниковые и мохово-кустарничковые	Почвы дерново-подзолистые песчано-супесчаные	4,7–4,9	596–628
3	Сосняки сложные кустарничково-разнотравные	Почвы дерново-подзолистые легко- и среднесуглинистые	4,7–4,9	620–660
4	Сосняки (с участием березы) травные	Почвы дерново-подзолистые легко- и среднесуглинистые	4,5–4,9	620–660
5	Березняки и березово-осиновые волосистоосоковые и вейниково-разнотравные	Почвы серые и светло-серые лесные среднесуглинистые	4,9–5	649–667
6	Хвойно-мелколиственные кустарничково-разнотравные леса	Почвы дерново-подзолистые почвы среднесуглинистые	4,9–5	649–667
7	Сосновые и сосново-березовые заболоченные леса	Торфяные, торфяно-глеевые и торфяно-болотные почвы	4,7–4,9	591–612
8	Хвойные разнотравно-зеленомошные и елово-широколиственные леса	Почвы дерново-подзолистые легко- и среднесуглинистые	4,3–4,8	643–667
9	Сосново-широколиственные разнотравно-осоковые леса (ПТЗ)	Почвы дерново-слабоподзолистые супесчаные	4,8–5	590–625
10	Широколиственные липово-дубовые и смешанные разнотравно-осоковые леса	Почвы серые лесные средне- и тяжелосуглинистые	4,8–5,1	647–653

2. Расчет допустимых уровней поступления азота в лесные экосистемы с атмосферными выпадениями выполняется отдельно для эффектов эвтрофирования и подкисления [6,19]. Это связано с тем, что кислотная нагрузка на лесные экосистемы может быть результатом совместного воздействия присутствующих в атмосфере оксидов азота и серы, тогда как изменение питательного (трофического) статуса биогеоценозов определяется пулом доступных биоте соединений азота. Эвтрофирование лесов проявляется в увеличении концентраций азота (преимущественно нитратов) в почвах, растительности и почвенно-грунтовых водах, что, помимо повышения продуктивности фитоценозов, сопровождается целым рядом экологических нарушений. Более детальная информация о воздействии техногенных соединений азота на природные экосистемы может быть получена из специальной литературы, например [20].

Базовые уравнения масс-баланса для расчета КН кислотообразующих и эвтрофирующих соединений (табл. 2, 3, № 1, 12) суммируют годовые миграционные потоки соединений азота и сопряженных элементов, определяющие их относительно долговременную иммобилизацию, нейтрализацию и удаление из биогеоценозов. В свою очередь, оценка этих частных процессов выполняется с учетом представлений о механизмах формирования того или иного миграционного потока. Так, например, внутрипочвенный пул катионов, образующихся в результате выветривания минералов и определяющих буферность почв к кислотному воздействию, является функцией их минералого-гранулометрического состава и температурных условий (табл. 3, № 15). Интенсивность относительно долговременного депонирования азота и катионов в древесной фитомассе лесной растительности определяется нетто-продукцией лесообразующих пород и концентраций элементов в стволовой древесине, ветвях и коре, которые могут существенно различаться для различных видов деревьев (табл. 2, 3, № 3, 16).

Таблица 2. Уравнения и параметры модели для расчета КН эвтрофирующих соединений азота

№	Обозначение	Экологический или физический смысл	Формула для расчета/ Характеристика переменных	Единицы измерения
1	$KN(N)_{nut}$	КН эвтрофирующих соединений азота	$= N_{upt} + N_{im} + N_{le(acc)}/(1-f_{de})$	г-экв./га в год
2	N_{im}	Долговременная иммобилизация азота в органическом веществе почв	Переменные значения в зависимости от почвенно-климатических условий	г-экв./га в год
3	N_{upt}	Закрепление азота в приросте древесины	$= Y_{hpp} * [N]_{wood}$	г-экв./га в год
4	Y_{hpp}	Ежегодная продукция стволовой древесины	Переменные значения в зависимости от преобладающих пород, бонитета, возраста и полноты древостоя	кг/га в год
5	$[N]_{wood}$	Концентрация азота в продукции отчуждаемой (депонируемой) фитомассы древесины	Переменные значения в зависимости от вида	г-экв./кг
6	$N_{le(acc)}$	Допустимое вымывание азота из почв в почвенно-грунтовые воды	$= Q_{le} * [N]_{acc}$	г-экв./га в год
7	Q_{le}	Слой инфильтрации (количество атмосферной влаги, формирующей почвенно-грунтовый сток)	$= P * k_{ET}$	м/год
8	P	Годовое количество атмосферных осадков	Переменные значения в зависимости от климатических условий	м/год
9	k_{ET}	Коэффициент, учитывающий потери влаги на эвапотранспирацию	Переменные значения в зависимости от типа растительности	—
10	$[N]_{acc}$	Концентрация азота в почвенном растворе, соответствующая оптимальному азотному питанию разных групп растительности	Переменные значения в зависимости от видового состава растительности	г-экв./м ³
11	f_{de}	Коэффициент денитрификации	Константы в зависимости от условий дренирования	—

Таблица 3. Уравнения и параметры модели для расчета КН кислотообразующих соединений

№	Обозначение	Экологический или физический смысл	Формула для расчета/ Характеристика переменных	Единицы измерения
12	КН (S) _{max}	КН кислотообразующих соединений	$= BC_{dep} + BC_{we} - Cl_{dep} - BC_{upt} - ANC_{le(crit)}$	г-экв./га в год
13	BC_{dep}	Суммарное поступление в экосистему основных катионов (Ca, Mg, K, Na) с атмосферными выпадениями	Переменные значения в зависимости от региональных условий	г-экв./га в год
14	Cl_{dep}	Суммарное поступление в экосистему с атмосферными выпадениями ионов Cl	Переменные значения в зависимости от региональных условий	г-экв./га в год
15	BC_{we}	Внутрипочвенное выветривание основных катионов (Ca, Mg, K, Na)	$= z * (BC_w(T^0) * 2.6^{(A/T^0 - A/T)})$	г-экв./га в год
16	BC_{upt}	Закрепление в продукции древесины физиологически активных катионов (Ca, Mg, K)	$= Y_{hpp} * [Bc]_{wood}$	г-экв./га в год
17	$ANC_{le(crit)}$	Критический уровень вымывания кислот – нейтрализующих компонентов почв	$= Q * ([H]_{(crit)} + K_{gibb} * ([H]_{(crit)})^3)$	г-экв./га в год
18	$BC_w(T^0)$	Внутрипочвенное выветривание катионов для станд. условий (слоя почвы 1м и температуры $T^0 = 283$ °К)	Переменные значения в зависимости от гранулометрического состава почв	г-экв./га в год
19	T	Среднепогодное значение температуры	Переменные значения, соответствующие региональным температурным условиям	°К
20	z	Мощность почвенного слоя	Переменные значения в зависимости от типа почв	м
21	A	Коэффициент	Стандартное значение, равное 3600	–
22	Y_{hpp}	Аналогично №4 табл. 2		кг/га в год
23	$[Bc]_{wood}$	Суммарная концентрация катионов в древесине	$= [Ca] + [Mg] + [K]$	г-экв./кг
24	$[Ca], [Mg], [K]$	Концентрации катионов в древесине	Переменные значения в зависимости от типа растительности	г-экв./кг
25	Q_{le}	Аналогично таблице 2		м/год
26	P	Аналогично таблице 2		м/год
27	k_{ET}	Аналогично таблице 2		–
28	$[H]_{crit}$	Критическая концентрация протонов (рН) в почвенном растворе для определенных групп растительности	Переменные значения в зависимости от типа растительности	г-экв./м ³
29	K_{gibb}	Коэффициент	Станд. значения в зависимости от свойств почвенных горизонтов	–

3. Данные, необходимые для расчетов КН кислотообразующих и эвтрофирующих соединений, получены нами из литературных источников, интернет-ресурсов и специализированных электронных баз данных открытого доступа ([11–18, 21–23] и др.). В расчетах учитывается более 20 показателей, разнородных по своей физической и экологической сущности (табл. 2–3). За исключением нескольких коэффициентов, имеющих стандартные значения (№ 11, 21, 29), для входных параметров уравнений масс-баланса был составлен вариабильный набор возможных величин. В зависимости от специфики конкретного показателя и наличия данных, этот набор состоял из 2–5 значений в определенном интервале величин (табл. 4). Распределение значений внутри рассматриваемого диапазона могло быть произвольным (не обязательно равномерным), в соответствии с имеющимися данными.

Таблица 4. Диапазоны значений входных параметров для рассматриваемых модельных групп лесных экосистем Московской области (данные температуры и осадков приведены в табл. 1; единицы измерения соответствуют приведенным в табл. 2,3)

Группа	N_{im}	Y_{hpp}	$[N]_{wood}$	$[N]_{acc}$	f_{de}	$BC_{dep} - Cl_{dep}$	BC_{we}	$[Bc]_{wood}$	$[H]_{crit}$
1	70–140	2958–3982	0.06–0.1	0.014–0.036	0.15–0.25	196–352	108–321	0.09–0.13	0.03–0.06
2	70–140	2958–3982	0.06–0.1	0.014–0.036	0.2–0.3	250–314	110–325	0.09–0.13	0.03–0.06
3	70–140	2958–3982	0.09–0.1	0.028–0.043	0.2–0.25	196–385	447–759	0.09–0.13	0.01–0.03
4	105–140	2958–3982	0.09–0.1	0.043–0.071	0.2–0.25	218–359	447–759	0.09–0.13	0.005–0.02
5	140–210	2260–1190	0.1–0.18	0.071–0.142	0.15–0.25	315–630	455–762	0.05–0.1	0.005–0.13
6	105–140	2260–1190	0.1–0.15	0.043–0.071	0.15–0.25	315–630	455–762	0.08–0.14	0.005–0.13
7	140–210	720–1040	0.06–0.14	0.028–0.071	0.5–0.7	250–384	0	0.09–0.13	0.03–0.06
8	70–140	1270–4240	0.12–0.22	0.028–0.043	0.15–0.25	195–385	445–755	0.12–0.16	0.01–0.03
9	70–105	710–1270	0.12–0.15	0.028–0.071	0.15–0.25	115–293	195–327	0.1–0.14	0.01–0.03
10	70–105	1470–2550	0.12–0.22	0.028–0.071	0.15–0.25	315–464	453–762	0.12–0.16	0.01–0.013

4. Метод Монте-Карло [24] использован в данной работе для генерации случайного сочетания климатических, геоморфологических и почвенно-геоботанических показателей, характерных для разных групп лесов Подмосковья и отражающих пространственную и межгодовую вариабельность условий их произрастания. Расчеты величин КН эвтрофирующих и подкисляющих соединений азота выполнены согласно уравнениям, приведенным в табл. 2, 3, для каждой группы лесов на основе 10 тысяч модельных прогонов, что позволило получить соответствующие вариационные ряды вероятных значений.

При анализе полученных распределений вероятных значений КН для каждого вариационного ряда определяли стандартные характеристики (минимум, максимум, среднее арифметическое, стандартное отклонение, дисперсию). Также для каждой модельной группы лесов определялись квантили, соответствующие 5, 25, 50, 75, и 95% - ным уровням значений КН. Помимо характеристики разброса выборки, данный

набор квантилей может быть использован для экологического обоснования КН поллютантов в соответствии с экотоксикологическими принципами, рассмотренными выше.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты анализа распределения величин КН эвтрофирующих и подкисляющих соединений для модельных групп лесных экосистем Московской области представлены в табл. 5. Величины КН кислотообразующих соединений характеризуются большим разбросом значений и большей контрастностью внутри групп и для области в целом, изменяясь от < 100 до > 1700 г-экв./га в год. В пересчете отдельно на соединения серы или азота эти значения соответствуют атмосферной поставке, равной 1–1.5 и 20 кг/га действующего вещества в год. Наименьшие показатели КН кислотообразующих соединений получены для различных вариантов сосняков на кислых почвах легкого гранулометрического состава (группы 1, 2, 7); эти леса распространены преимущественно на севере, востоке и юго-востоке области. В данном случае низкие показатели КН (в среднем 350–400 г-экв./га в год) объясняются пониженным содержанием в этих типов почвах основных катионов, способных нейтрализовать кислотные выпадения. Низкие значения КН кислотообразующих соединений рассчитаны и для экосистем ПТЗ (группа 9), что также связано с характером почвенного покрова – преобладанием на территории заповедника почв супесчаного состава. Максимальные нагрузки (> 1000 г-экв./га в год) допустимы, по нашим расчетам, для лесных территорий с мелколиственными (березово-осиновыми) и хвойно-мелколиственными лесами, почвенный покров которых представлен дерново-подзолистыми и серыми лесными почвами средне- и тяжелосуглинистого состава. Основной ареал распространения этих лесов приурочен к центральным, южным и юго-западным районам Подмосковья (группы 5, 6).

Таблица 5. Стандартные характеристики распределения вероятных значений КН эвтрофирующих и подкисляющих соединений для модельных групп лесных экосистем Московской области

Номер группы	Значения КН эвтрофирующих соединений (г-экв./га в год)			Значения КН кислотообразующих соединений (г-экв./га в год)		
	Минимум – Максимум	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум – Максимум	Среднее	Стандартное отклонение
1	235 – 555	387	20	16 – 657	343	116
2	227 – 544	377	19	95 – 636	382	100
3	330 – 569	442	21	331 – 1060	686	144
4	367 – 676	503	22	341 – 1004	659	137
5	416 – 1022	675	26	647 – 1746	1139	223
6	306 – 644	456	21	577 – 1720	1102	228
7	263 – 789	466	22	236 – 480	364	59
8	255 – 918	515	23	227 – 1131	675	164
9	208 – 504	333	18	209 – 655	426	88
10	317 – 748	507	23	529 – 1150	836	148

В отношении эффектов эвтрофирования полученное распределение КН менее дифференцировано и изменяется от 208 до 1022 г-экв./га, составляя в среднем для разных групп лесов Подмосковья 333–675 г-экв./га в год. Рассчитанные средние значения КН эвтрофирующих соединений азота соответствуют допустимой ежегодной поставке 5–10 кг N/га. Максимальный уровень нагрузок (до 15 кг N/га в год) допустим в отношении средневозрастных березово-осиновых лесов на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, напочвенный покров которых представлен преимущественно мезотрофными и эвтрофными осоково-разнотравными видами (группа 5). Для

экосистем ПТЗ рассчитанные величины КН эвтрофирующих соединений азота имеют минимальные показатели – около 5 кг N/га в год. Оценки, полученные для ПТЗ, объясняются преобладанием на его территории относительно старовозрастных лесов, ежегодный прирост древесной фитомассы в которых ниже, чем в средневозрастных и молодых лесах. Также, при расчетах КН эвтрофирующих соединений на экосистемы ПТЗ считали, что «прогнозируемые» концентрации азота в почвенном растворе (параметр $[N]_{acc}$ в табл. 1) не должны превышать критические значения для олиготрофных видов [20], что соответствует принципу максимального сохранения видового разнообразия заповедных территорий. Полученные нами результаты и выявленные закономерности согласуются с существующими в геохимической экологии представлениями об устойчивости экосистем к воздействию кислотообразующих и эвтрофирующих поллютантов [20,25].

Анализ величин КН в полученных выборках модельных групп позволил определить процентное соотношение рассчитанных уровней нагрузок для разных типов лесных экосистем Подмосковья (рис. 1, 2). Экологически обоснованным можно считать уровень КН, на долю которого приходится более половины от представленных в выборке значений.

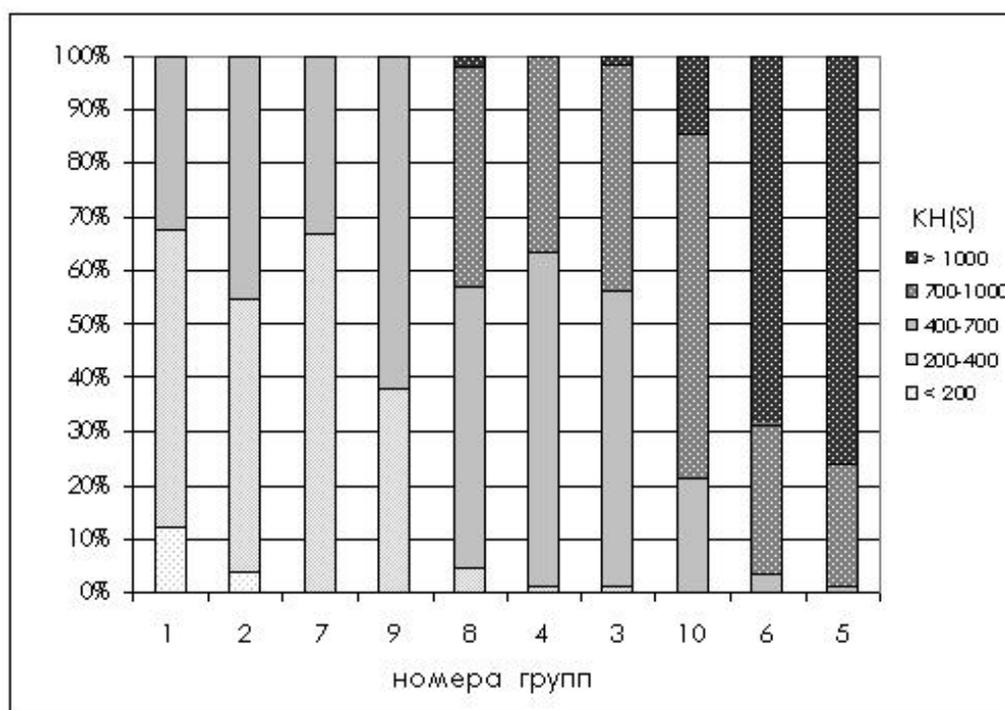


Рис. 1. Соотношение величин КН кислотообразующих соединений (г-экв./га в год) в рассчитанных выборках вероятных значений для модельных групп лесов Московской области.

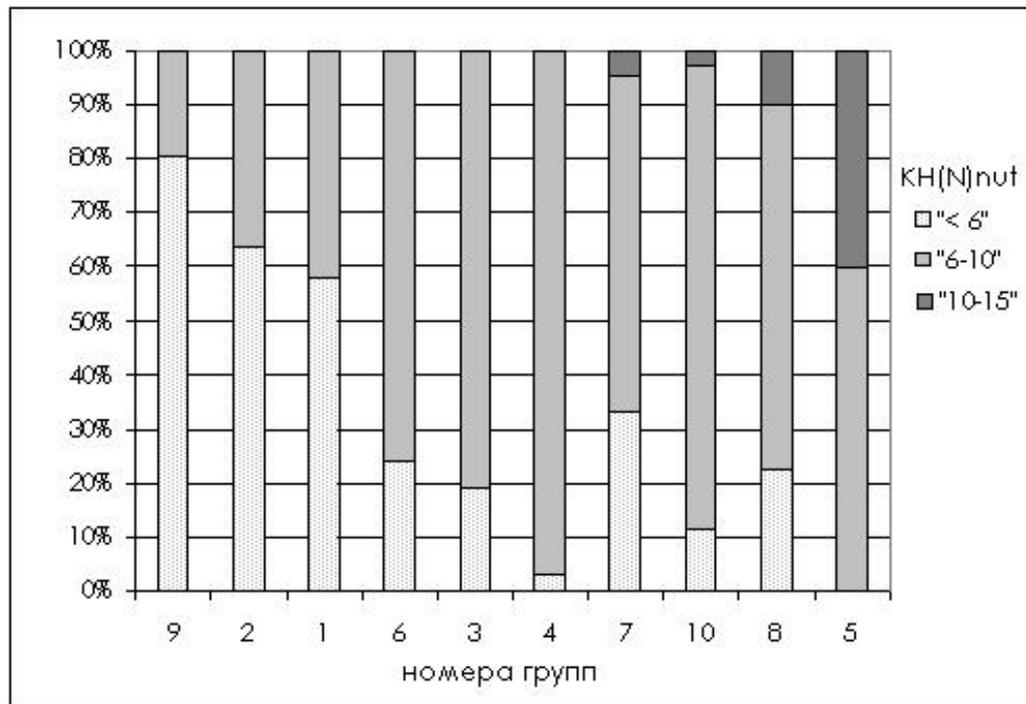


Рис. 2. Соотношение величин КН эвтрофирующих соединений азота (кг N/га в год) в рассчитанных выборках вероятных значений для модельных групп лесов Московской области.

Анализ распределения квантилей (рис. 3–4) позволил дать более детальную характеристику полученным выборкам. Естественно, что разброс значений КН и плотность выборок для разных модельных групп зависит от специфики использованных в расчетах входных данных и концептуальных принципов оценки. В том числе, они отражают диапазон экологических условий, благоприятных для произрастания различных типов леса, и их распространенность в пределах Московской области. Так, минимальный разброс и низкие значения КН кислотообразующих соединений получены для заболоченных лесов (группа 7), которые по этим критериям могут быть «объединены» с уже упоминавшимися группами сосняков (группы 1, 2). В тоже время, для мелколиственных и хвойно-мелколиственных лесов (группы 5, 6) высокие показатели КН сочетаются с наибольшим разбросом полученных значений; по-видимому, эти модельные группы также могут быть объединены по рассматриваемым критериям. В отношении эффектов эвтрофирования результаты расчетов интерпретировать сложнее. Для четырех модельных групп (4, 5, 7, 10) нами получены несимметричные распределения величин КН, сочетающиеся с большим размахом выборки. Эти модельные группы представлены лесными биогеоценозами, относительно разными по своим эколого-ценотическим характеристикам, но довольно широко распространенными в пределах исследуемой территории, что требует более внимательного анализа исходных данных. Для групп, имеющих близкое к нормальному распределение (это преимущественно различные варианты хвойных лесов), с вероятностью 0.9 рассчитанные значения КН эвтрофирующих соединений азота соответствуют диапазону 250–610 г-экв./га в год или 4–9 кг N/га в год. В качестве максимально обоснованной нагрузки, соответствующей 50% квантилю, согласно экотоксикологическим принципам, может быть рекомендован уровень поступления азота с атмосферными выпадениями 5–7 кг N/га в год.

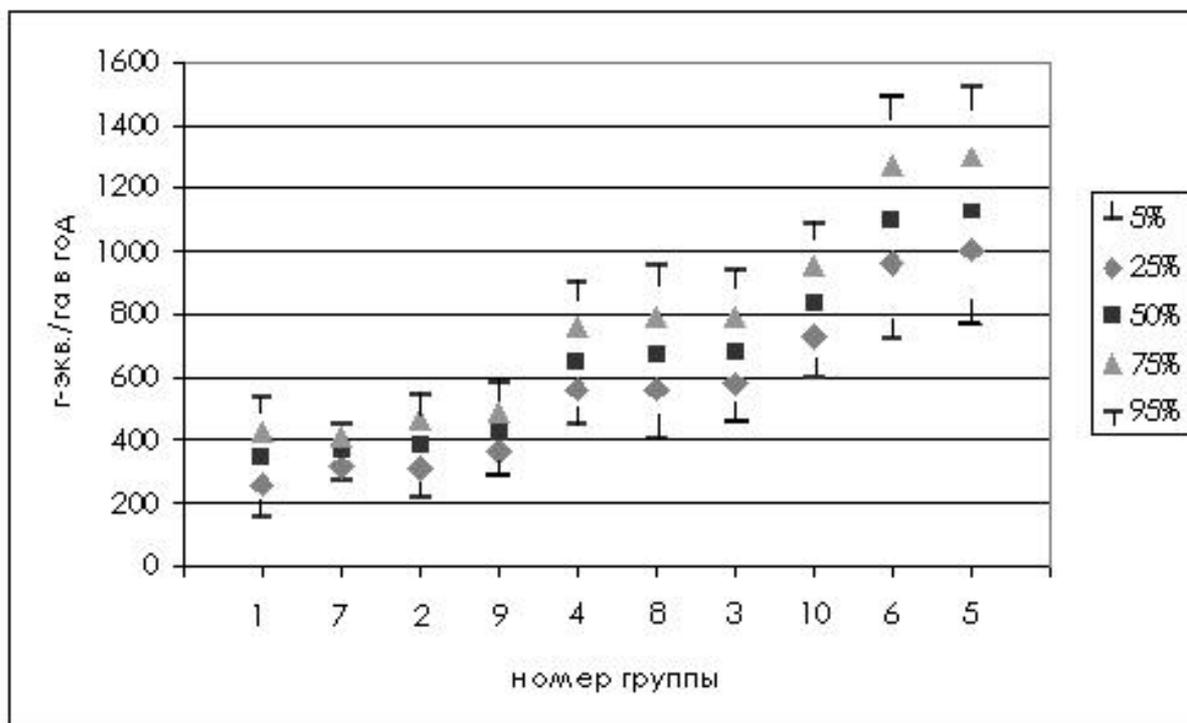


Рис. 3. Характеристика полученных выборок значений КН кислотообразующих соединений для модельных групп лесных экосистем Московской области на основе квантилей (номера групп – согласно табл. 1; пояснения в тексте).

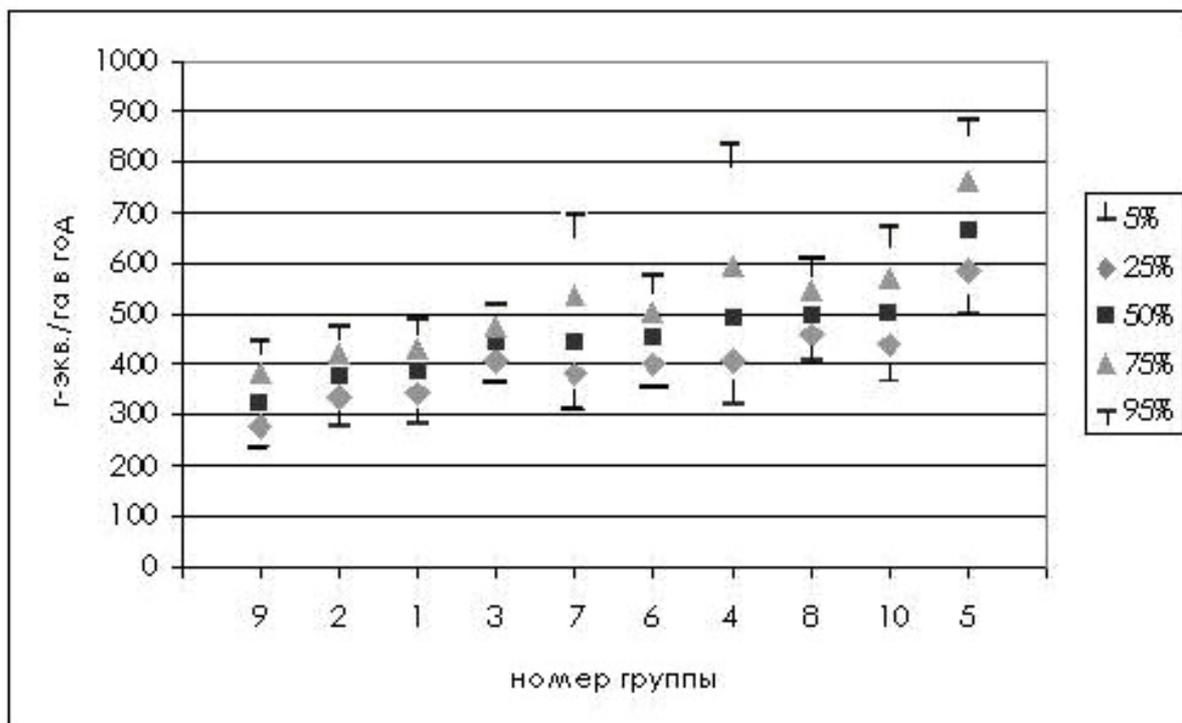


Рис. 4. Характеристика полученных выборок значений КН эвтрофирующих соединений для модельных групп лесных экосистем Московской области на основе квантилей (номера групп – согласно табл. 1; пояснения в тексте).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные оценки показывают, что использование стохастических методов при решении уравнений биогеохимического масс-баланса позволяет получить дополнительную информацию, имеющую практическое значение для экологического обоснования интенсивности техногенных нагрузок на окружающую среду и минимизации экологических рисков, связанных с хозяйственной деятельностью человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Г.А., Логофет Д.О. Динамическая модель совместного круговорота органического вещества и азота в биогеоценозе переходного болота. В: *Математическое моделирование биогеоценологических процессов*. М.: Наука, 1985. С. 80–97.
2. Sverdrup H. *A steady state soil chemistry model PRPFIL*. URL: <http://www2.chemeng.lth.se/models/profile/index.shtml> (дата обращения: 4.10.2011).
3. *Modelling and Mapping of Critical Thresholds in Europe. CCE Status Report 2003. RIVM Report no. 259101012/2003*. Eds. M.Posch, J-P.Hettelingh, J.Slootweg. The Netherlands, Bilthoven, 2003. 132 p.
4. Казанцева Т.И. Балансовая модель экосистемы мелкого высокоэвтрофного озера. *Журнал общей биологии*. 2003. Т. 64. № 2. С. 128–145.
5. Shanin V.N., Komarov A.S., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S. Modelling carbon and nitrogen dynamics in forest ecosystems of Central Russia under different climate change scenarios and forest management regimes. *Ecological Modelling*. 2011. V. 222. № 14. P. 2262–2275.
6. *UBA Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends*. Chapter 5.5. 2004. URL: <http://www.icpmapping.org> (дата обращения: 20.10.2011).
7. Posch M., De Vries W. Derivation of critical loads by steady-state and dynamic soil models. In: *The Impact of Nitrogen Deposition on Natural and Semi-natural Ecosystems*. Ed. Langan S.J. The Netherlands: Kluwer, Dordrecht, 1999. P. 213–234.
8. Башкин В.Н., Козлов М.Я., Припутина И.В., Абрамычев А.Ю. Региональная оценка устойчивости экосистем европейской части России к атмотехногенным выпадениям серы и азота. 1. Количественная оценка и картографирование критических нагрузок соединений серы и азота на наземные и пресноводные системы. *Проблемы региональной экологии*. 1997. № 1. С. 57–78.
9. Van der Salm C., De Vries W. A review of the calculation procedure for critical acid loads for terrestrial ecosystems. *Science of the Total Environment*. 2001. V. 271. № 1–3. P. 11–25.
10. Пахт Е.В., Абакумов А.И. Неопределенность при моделировании экосистемы озера. *Математическая биология и биоинформатика*. 2011. Т. 6. № 1. С. 102–114. URL: [http://www.matbio.org/2011/Abakumov2011\(6_102\).pdf](http://www.matbio.org/2011/Abakumov2011(6_102).pdf) (дата обращения 12.05.2011).
11. Ревич Б.А., Авалиани С.Л., Тихонова Г.И. *Экологическая эпидемиология*. М.: Изд. центр «Академия», 2004. 384 с.
12. Аненская Г.Н., Жучкова В.К., Калинина В.Р., Мамай И.И., Низовцев В.А., Хрусталева М.А., Цесельчук Ю.Н. *Ландшафты Московской области и их современное состояние*. Смоленск: Изд-во Смоленского госуниверситета, 1997. 296 с.
13. *Леса Восточного Подмосковья*. М.: Наука, 1979.
14. *Леса Западного Подмосковья*. М.: Наука, 1982.
15. *Леса Южного Подмосковья*. М.: Наука, 1985.

16. *Динамика хвойных лесов Подмосковья*. М.: Наука, 2000.
17. *Атлас Московской области*. М.: ГУГК, 1976. 40 с.
18. *World Water and Climate Atlas*. 2002. URL: <http://www.cru.uea.ac.uk> (дата обращения 12.05.2011).
19. Posch M., de Vries W., Hettelingh J-P. Calculation and Mapping Critical loads of Sulfur and Nitrogen. In: *Calculation and Mapping of Critical Thresholds in Europe. RIVM Report. № 259101004*. The Netherlands: CCE, Bilthoven, 1995. P. 31–47.
20. Bobbink R., Ashmoore M., Braun S., Flukiger W., Van der Wyngaert I.J.J. *Empirical Critical Loads for Nitrogen*. Switzerland: SAEFL, Bern, 2002. 143 p.
21. *Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии*. М.: МПР РФ. 2006. 803 с.
22. Ремезов Н.П., Быкова Л.Н., Смирнова К.М. *Потребление и круговорот азота и зольных элементов в лесах европейской части СССР*. М.: МГУ. 1959. 283 с.
23. *Материалы наблюдений Подмосковной воднобалансовой станции*. М.: Гидрометеиздат, 1980 г. Вып. 22. 1981.
24. Соболев И.М. *Метод Монте-Карло*. М., Наука, 1985. 64 с.
25. Глазовская М.А. Качественные и количественные оценки сенсорности и устойчивости природных систем к техногенным кислотным воздействиям. *Почвоведение*. 1994. № 1. С. 134–139.

Материал поступил в редакцию 25.11.2011, опубликован 14.05.2012.