

УДК 577.1+577.48

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МАСС-БАЛАНСА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ЭКОСИСТЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ АТМОСФЕРНЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ

© 2009 И.В. Припутина¹, А.В. Танканаг², И.Ю. Аверкиева¹

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино, Московская обл.; e-mail: i.priputina@gmail.com, averkieva25@rambler.ru

²Институт биофизики клетки РАН, г. Пущино, Московская обл.; e-mail: tav@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются подходы к оценке устойчивости наземных экосистем в отношении воздействия атмосферных поллютантов, базирующиеся на использовании моделей биогеохимического масс-баланса вещества. На примере территории Республики Коми представлены результаты расчетов допустимых параметров поступления с атмосферными выпадениями соединений азота, превышение которых определяет экологические риски эвтрофирования природных биогеоценозов.

Ключевые слова: модели простого масс-баланса, биогеохимический круговорот азота, критические нагрузки, эффекты эвтрофирования экосистем

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, математическое моделирование экологических и биологических систем широко используется для решения практических задач охраны окружающей среды и рационального природопользования, когда невозможно проведение натурных экспериментальных исследований, например, для прогноза динамики техногенных изменений экосистем и определения параметров их устойчивости в отношении воздействий различных поллютантов. Техногенные соединения, поступающие в окружающую среду в результате хозяйственной деятельности человека, как правило, не остаются в неизменном виде, а «включаются» в уже существующие в природе потоки миграции вещества. Поэтому подобные оценки могут быть выполнены на основе моделей биогеохимического масс-баланса, реализованных для природно-территориальных комплексов разного иерархического уровня и с разной степенью детализации [12, 17].

В настоящей работе приведен пример использования простой модели масс-баланса в рамках региональных исследований по оценке допустимых параметров поступления соединений азота в наземные экосистемы с атмосферными выпадениями. Объект исследования – участок территории Республики Коми вдоль трассы газопровода «Ямал-Европа», что связано с планируемым увеличением в ближайшие годы объемов транспортировки природного газа из районов Крайнего Севера в центральную Россию и европейские страны и как следствие, ожидаемым ростом региональных уровней атмосферной эмиссии окси-

дов азота [5, 9]. Экологические последствия загрязнения воздушной среды соединениями азота, обуславливающего их повышенное поступление в наземные и водные экосистемы с атмосферными выпадениями, хорошо известны на примере территории Западной и Северной Европы [12, 16]. Основные негативные эффекты для биотических компонентов экосистем условно могут быть подразделены на две группы, связанные с процессами эвтрофирования и подкисления, биогеохимическими индикаторами которых являются увеличение концентраций азота в почвенном растворе и кислотности почв по сравнению с «критическими» значениями [19].

ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ

Биогеохимический баланс азота в природных экосистемах складывается из совокупности многих ландшафтно-геохимических и микробиологических процессов, особая роль в которых принадлежит наземной растительности и почвенной биоте [6, 13]. В настоящее время разработаны достаточно детальные модели круговорота азота, максимально учитывающие трансформацию и миграцию соединений азота в системе «атмосфера – осадки – почва – почвенная биота – растительность – почвенно-грунтовые воды».

Однако для оценки устойчивости экосистем на региональном уровне возможно использование упрощенной модели, включающей в себя ограниченное число параметров, определяющих интенсивность долговременной иммобилизации поллютантов в отдельных компонентах экосистем, их возможной нейтрализации и удаления за

пределы экосистем с продукцией биомассы или почвенно-грунтовым стоком [17]. Именно этот подход использован в методологии критических нагрузок (КН), развиваемой в рамках научного обеспечения международной Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния [14].

Согласно определению, величина КН ограничивает допустимый порог поступления загрязняющих веществ в экосистемы, ниже которого не происходит нарушений в их функционировании, структуре и биоразнообразии в течение длительного (50-100 лет) периода времени [15]. Таким образом, уровень техногенного воздействия ниже величин КН обеспечивает долговременное отсутствие негативных изменений, тогда как превышение КН является показателем потенциального экологического риска. Основные принципы и методы расчета КН освещены в западных [18, 19] и российских публикациях [3, 10]. В этих моделях делается целый ряд допущений, а именно:

- глубина рассматриваемого слоя почвы условно равняется глубине корневой зоны, что позволяет пренебречь циклом питательных веществ;

- эвапотранспирация происходит на поверхности профиля почвы;
- просачивание влаги атмосферных осадков является постоянным по всему профилю почвы и происходит только вертикально;
- физико-химические константы принимаются однородными по всему почвенному профилю; внутренние потоки элементов (азотфиксация и др.) не зависят от химических условий почвы (таких как pH).

Также не учитываются внутренние «экосистемные» взаимодействия, такие как внутривидовая конкуренция или наличие вредителей, вынос элементов из почвы с приростом той части наземной биомассы, которая ежегодно возвращается на поверхность с опадом растительности, и другие.

Для соединений азота в отношении эффектов эвтрофирования рассчитывают так называемые КН питательного азота ($KH(N)_{nut}$). Расчет величин КН включает параметризацию миграционных потоков (таблица), специфичных для разных биоклиматических и ландшафтных условий.

Таблица. Параметры уравнения масс-баланса для расчета величин КН питательного азота и характеристика входных данных

Условные обозначения	Наименование параметра	Единицы измерения	Формула для расчета / источник данных
$KH(N)_{nut}$	Критическая нагрузка питательного азота	г-экв./га/год	$= N_{upt} + N_{im} + N_{le(acc)} / (1 - f_{de})$
N_{upt}	Закрепление азота в продукции наземной биомассы	г-экв./га/год	$= Y_{hpp} * [N]$
Y_{hpp}	Ежегодная продукция наземной биомассы	кг/га/год	По данным: Бобкова, 1990; Лесное хозяйство..., 2000.
$[N]$	Концентрация азота в продукции биомассы	г-экв./кг	По данным: Бобкова, 1990; Пристина, 2003
N_{im}	Долговременная иммобилизация азота в почве	г-экв./га/год	По данным: Кудеяров и др., 2008; UBA, 2004
$N_{le(acc)}$	Допустимое вымывание азота	г-экв./га/год	$= Q_{le} * [N]_{acc}$
Q_{le}	Слой инфильтрации осадков	м	Пространственно-распределенные данные, рассчитанные на основе: www.cru.uea.ac.uk
$[N]_{acc}$	Критическая концентрация азота в почвенном растворе	экв./м ³	В соответствии с рекомендациями (UBA, 2004) для видов-эдикаторов
f_{de}	Коэффициент денитрификации азота в почве	-	В соответствии с рекомендациями (UBA, 2004) в зависимости от гранулометрического состава почв

Описывая условия равновесного биогеохимического состояния, данная модель является статической и требует использования в качестве входной информации детерминированных показателей (констант и долгосрочных усредненных значений миграционных потоков). Сезонные, межгодовые и другие краткосрочные динамические изменения в данной модели не учитываются. В Европе, где в большинстве стран существует достаточно детальная сеть мониторинговых на-

турных наблюдений, для расчетов величин КН используются измеренные средние показатели, характеризующие участки территорий с высокой степенью детальности.

Однако при расчетах КН для крупных регионов со слабой степенью изученности или сложной природной структурой возникают проблемы, связанные с высокой степенью неопределенности и пространственной дифференциацией большинства природных показателей. На наш взгляд,

в этом случае более корректные оценки могут быть получены за счет использования вероятностных методов расчета КН, например, метода Монте-Карло. В этом случае для ряда параметров модели по литературным и картографическим данным определяется набор возможных значений, включение которых в расчеты происходит «случайным образом». В данной работе для каждой экосистемы (участка территории 1×1 км) было проведено 1000 прогонов модельных рас-

четов, что позволило получить вероятностное распределение – диапазон возможных значений КН питательного азота. Анализ распределения полученных вероятных значений КН позволяет обосновать интенсивность техногенных нагрузок в зависимости от природоохранных приоритетов и/или экономической целесообразности использования территорий и их природных ресурсов (рис. 1).



Рис. 1. Кривая распределения вероятных значений допустимых нагрузок загрязнителей для условной экосистемы

База данных для вероятностных расчетов величин КН азота в отношении эффектов эвтрофирования экосистем для территории Республики Коми была сформирована в виде ГИС-проекта в программной среде ArcView, что позволило проводить текущий анализ и визуализацию получаемых данных. Рассмотрена трансекта шириной около 50 км вдоль трассы Микунь – Ухта – Печора – Инта – Воркута. Детальность пространственного разрешения – 1×1 км. Для лесных экосистем были рассмотрены наиболее типичные сценарии рубок. Для травянистых и кустарниково-травянистых экосистем тундровой и лесной зон рассмотрены сценарии возможного хозяйственного использования включал использование территорий в качестве пастбищ, в том числе в северных районах для оленеводства.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате выполненных расчетов получена детальная пространственно распределенная информация, характеризующая специфику биогеохимического цикла азота в различных зональных и интразональных типах тундровых, лесотундровых и таежных экосистем Республики Коми. На рис. 2 и 3 приведены примеры пространствен-

ного распределения полученных значений КН питательного азота для 50%-ного и 95%-ного уровней значений на участке Ухта-Инта. Согласно оценкам, допустимый уровень поступления азота с атмосферными выпадениями составляет для данной территории от 200-400 до 700-1000 г-экв./га в год (или от 3-6 до 10-15 кг N/га в год). Анализ полученных результатов свидетельствует о дифференцированности экосистем исследуемого региона к величине поступления азота с атмосферными выпадениями. Так, например, вынос азота из лесных экосистем таежной зоны с приростами древесины при разных вариантах рубок оценивается в 0,5-1,5 кг N/га в год в притундровых смешанных лесах и 6-10 кг N/га в год для высокопродуктивных среднетаежных ельников. При оценке допустимых уровней выноса азота с почвенно-грунтовыми водами были рассмотрены 2 сценария, соответствующие предупреждению эффектов дисбаланса азотного питания для растений эдификаторов (древесных видов в лесах и наземных в травянистых биоценозах) и эффектов снижения биоразнообразия напочвенного покрова. В первом случае данные величины могут составлять 1-2,5 кг N/га, при этом уровень концентраций азота в почвенном растворе соответствует в среднем 0,2-0,4 мг N/л в

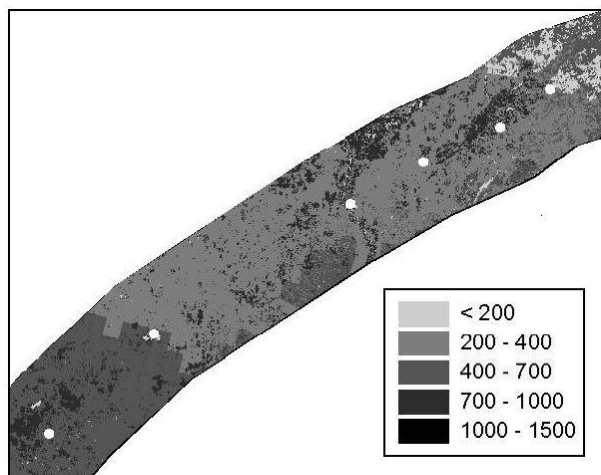


Рис. 2. Пространственное распределение величин КН азота: 50% уровень значений. (величины в легенде – г-экв./га в год; 700 г-экв./га = 10 кг N/га)

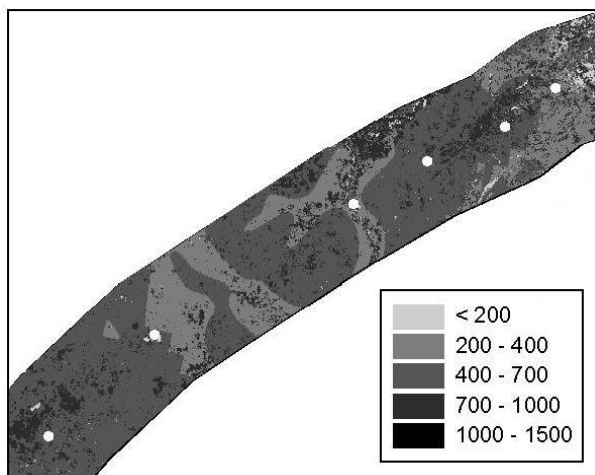


Рис. 3. Пространственное распределение величин КН азота: 95% уровень значений. (величины в легенде – г-экв./га в год; 700 г-экв./га = 10 кг N/га)

зависимости от типа древостоев. Эффекты нарушения видового разнообразия (увеличение доли нитрофильных и снижение олиготрофных видов) возможны, когда концентрация азота в почвенном растворе превышает для лишайников и мхов величину 0.2-0.4 мг N/л, для кустарничковых видов – 1 мг N/л, для осок и злаков – 1-3 мг N/л [19]. С учетом высокого уровня атмосферных осадков, характерных для исследуемой территории, рассчитанные параметры допустимого вымывания азота с почвенно-грунтовым стоком составили диапазон 1,5-7 кг N/га для тундровой зоны и 7-10 кг N/га для лесных территорий.

Авторы выражают благодарность проф., д.б.н. К.С. Бобковой (Институт биологии КНЦ УрО РАН) за консультации по вопросам оценки продуктивности лесов Республики Коми. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 07-05-00492).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Г.А., Логофет Д.О. Динамическая модель совместного круговорота органического вещества и азота в биогеоценозе переходного болота // Математическое моделирование биогеоценологических процессов. М.: Наука, 1985. С. 80-97.
2. Базилевич Н.И. Баланс химических веществ в природных, трансформированных и искусственных экосистемах: Концептуальные модели // Гетеротрофы в экосистемах Центральной лесостепи. М.: ИГАН СССР, 1979. С. 236-258.
3. Башкин В.Н., Припутина И.В., Абрамычев А.Ю., Танканин А.В. Количественная оценка и картографирование критических нагрузок серы и азота на наземные и пресноводные экосистемы европейской части России. Часть II // Проблемы региональной экологии, 1998. № 1. С. 26-42.
4. Бобкова К.С. Экологические основы продуктивности хвойных лесов европейского северо-востока. Дис. докт. биол. наук. Сыктывкар. 1990.
5. Бухгалтер Э.Б., Пыстина Н.Б. Магистральный транспорт газа и экологическое состояние земель в районах прохождения газопроводов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2008, № 8, С. 90-94.
6. Ковда В.А. Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком. М.: Наука, 1975. 73 с.
7. Кудеяров В.Н., Демкин В.А., Комаров А.С. Природная и антропогенная эволюция почв, круговорот углерода в ландшафтах в связи с изменениями климата и катастрофическими явлениями // Изменение окружающей среды и климата природные и связанные с ними техногенные катастрофы: 8 т. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 13-35.
8. Лесное хозяйство и лесные ресурсы Республики Коми. /Под ред. Г.М. Козубова, А.И. Таскаева. М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2000. 512 с.
9. Минигулов Р.М., Райкевич С.И., Фокина Л.М. Новые технологии сокращения выбросов оксидов азота в атмосферу // Газовая промышленность, 2005. № 5. С. 74-76.
10. Припутина И.В. Влияние почвенных условий на параметры устойчивости экосистем Европейской России к техногенным выпадениям поллютантов // Почва как связующее звено природных и антропогенно-преобразованных экосистем. Иркутск: ИГУ. 2006. С. 239-241.
11. Пристина Т.А. Биологический круговорот азота и зольных элементов в лиственно-хвойном насаждении подзоны средней тайги. Дис... канд.

- биол. наук. Сыктывкар, 2003.
12. *Bobbink R., Hornung M., Roelofs J.G.* The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation // *J. Ecology*. 1998. V. 86, № 5. P. 717-738.
 13. *Boyer E., Howarth R.* (Eds.) The nitrogen cycle at regional to global scale. Report of the Intern. SCOPE Nitrogen Project. Dordrecht. Boston, London: Kluwer Academic Publishers. 2002. 519 pp.
 14. Mapping Manual for modelling and mapping of critical loads and their input data (2004) <http://www.icpmapping.org>.
 15. *Nilsson J., Grennfelt P.* Critical loads for sulphur and nitrogen. Report from a Workshop held at Skokloster Sweden March 19-24 1988. Moljo rapport 1988: 15. Copenhagen Denmark Nordic Council of Ministers.
 16. *Nordin A., Strengbom J., Witzell J. et al.* Nitrogen deposition and the biodiversity of boreal forests: implications for the nitrogen critical loads // *Ambio* 2005. V. 34, № 1. P. 20-24.
 17. *Posch M., de Vries W., Hettelingh J.-P.* (1995) Critical loads of sulphur and nitrogen // Calculation and mapping of critical thresholds in Europe. Status report 1995. P. 31-47.
 18. *Reinds GJ, Posch M., De Vries W.* A semi-empirical dynamic soil acidification model for use in spatially explicit integrated assessment models for Europe. Alterra Green World Research, Rep. 084. Wageningen, the Netherlands, 2001. 55 p.
 19. UBA (2004) Mapping Manual for modelling and mapping of critical loads and their input data. <http://www.icpmapping.org>. 2004.

APPLICATION OF THE MODELS OF BIOGEOCHEMICAL MASS-BALANCE FOR ESTIMATING ECOSYSTEMS SUSTAINABILITY TO AIR POLLUTANTS IMPACT

© 2009 I.V. Pripulina, A.V. Tankanag², I.Yu. Averkieva¹

¹Institute of physicochemical and biological problems in soil science of RAS, Pushchino, Moscow region; e-mail: i.pripulina@gmail.com, averkieva25@rambler.ru

²Institute of cell biophysics, Pushchino, Moscow region; e-mail: tav@mail.ru

This article is a view on some approaches to estimate a sustainability of terrestrial ecosystems to air pollutants impact based on using biogeochemical mass-balance model. On the example of Komi Republic, the results of calculating permissible levels of nitrogen inputs to the ecosystems with air depositions are discussed. Exceeding these values will be effected in risks of natural ecosystems eutrophication.

Key words: *simple mass-balance model, biogeochemical cycle of nitrogen, critical loads, eutrophication effects*