

УДК 504.054: 574.21: 502.2.05

МЕТОДОЛОГИЯ КРИТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И ЕЕ РАЗВИТИЕ В СВЯЗИ С КОНВЕНЦИЕЙ О ТРАНСГРАНИЧНОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ ВОЗДУХА НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

И.В. Припутина

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
Россия, 142290, Московская обл., г. Пушкино, Институтская ул., 2,
irina.priputina@gmail.com

Резюме. В статье представлены основные положения и история развития методологии критических нагрузок. Она используется для количественной оценки допустимых уровней воздействия атмосферных загрязняющих веществ на наземные и пресноводные экосистемы в рамках международной Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. Приведены примеры использования методологии критических нагрузок, в том числе, в отечественных экологических исследованиях.

Ключевые слова. Атмосфера, загрязняющие вещества, критические нагрузки, кислотообразующие выпадения, эвтрофирование экосистем, модели баланса массы, биоиндикаторы, критические уровни.

CRITICAL LOADS METHODOLOGY AND ITS ELABORATION IN CONNECTION WITH THE CONVENTION ON LONG-RANGE TRANSBOUNDARY AIR POLLUTION

I.V. Priputina

Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science,
Russian Academy of Sciences
2, Institutskaya Str., Pushchino, Moscow region, 142290, Russia,
irina.priputina@gmail.com

Summary. The article presents basic approaches and history of the development of critical loads methodology. The methodology is used for quantitative assessment of permissible levels of impacts of atmospheric pollutants on terrestrial and freshwater ecosystems in the context of the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. Examples of critical loads methodology application are presented, in particular, in Russian environmental researches.

Keywords. Atmosphere, pollutants, critical loads, acid deposition, ecosystem eutrophication, mass-balance models, bioindicators, critical levels.

Введение

Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (The Convention on Long-Range Transboundary Air

Pollution, далее Конвенция), подписанная в Женеве в 1979 г. и объединяющая в настоящий момент 51 государство, включая РФ, относится к числу первых международных конвенций в области охраны окружающей среды. Ее принятие было связано с необходимостью решения проблемы кислотных дождей, вызванных техногенным загрязнением атмосферного воздуха кислотообразующими соединениями (прежде всего, оксидами серы и азота). Эта экологическая проблема, ставшая в 1970-1980-х годах особо актуальной для стран северной и центральной Европы, показала условность государственных границ при распространении загрязняющих веществ, когда техногенные выбросы от источников в одних странах становятся причиной деградации экосистем в соседних государствах (Agren, 2000). Подробная информация о структуре и рабочих органах Конвенции представлена на сайте <http://www.unece.org/env/lrtap/welcome.html>.

Список атмосферных поллютантов, включенных в Конвенцию, со временем был расширен и, помимо оксидов серы и соединений азота, включает тяжелые металлы (Pb, Cd, Hg и др.), стойкие органические соединения (Persistent Organic Pollutants), приземный озон и твердые частицы. Мониторинг их трансграничного распространения проводится в рамках европейской программы ЕМЕП (The European Monitoring and Evaluation Programme; <http://www.emep.int>), входящей в структуру Конвенции.

В рамках Конвенции решаются следующие основные задачи:

- Инвентаризация национальных данных о выбросах загрязняющих веществ и количественное определение вклада каждой из европейских стран в загрязнение воздушной среды в разных регионах Европы.
- Выявление и мониторинг экологических эффектов для здоровья человека, состояния биоты и технологических объектов, вызванных поступлением в природные среды атмосферных поллютантов. Оценка интенсивности процессов деградации природных экосистем при разных уровнях поступления загрязняющих веществ с атмосферными выпадениями.
- Количественное определение экологически допустимых уровней поступления поллютатов из атмосферы для разных типов экосистем и их картографирование на национальном и общеевропейском уровне. Сравнительный анализ экологически безопасных и реальных уровней выпадений поллютантов с целью обоснования сокращения объемов техногенной эмиссии загрязняющих веществ разными странами.
- Анализ и распространение информации о технологиях снижения техногенной эмиссии загрязняющих веществ в разных секторах экономики.

- Разработка согласованной межгосударственной политики по снижению загрязнения воздушной среды.

За прошедшие годы основной текст Конвенции был дополнен восемью Протоколами, в которых сформулированы согласованные мероприятия по организации мониторинга и сокращению эмиссии загрязняющих веществ странами, подписавшими Конвенцию. Наиболее значимым результатом ее деятельности является существенное снижение эмиссии оксидов серы в Европе, интенсивность которой в период с 1980 по 2004 г. сократилась примерно на 75% (Sliggers, Kakebeeke, 2004), а также зафиксированное снижение уровней их содержания на станциях ЕМЕП (Tørseth et al., 2012).

Следует отметить значительный вклад Советского Союза, а затем Российской Федерации в подготовку и реализацию основных направлений деятельности Конвенции, в том числе, в обеспечение регулярной оценки трансграничного переноса и выпадений тяжелых металлов и стойких органических соединений, которые выполняются в международном Метеорологическом Синтезирующем Центре ЕМЕП «Восток» в Москве (<http://www.msceast.org/>).

Для выполнения задач Конвенции, помимо координирующих органов, были созданы несколько центров и международных программ сотрудничества, осуществляющих научные исследования, в которых важная роль принадлежит экологическому мониторингу и математическому моделированию процессов переноса и трансформации загрязняющих веществ в воздушной среде, почвах и водных экосистемах. Обязательной составляющей этих исследований является широкое обсуждение их результатов на постоянно организуемых в рамках Конвенции совещаниях и конференциях, а также в многочисленных публикациях (<http://www.unece.org/env/treaties/publications.html>; <http://wge-cce.org/Publications>).

В данной статье мы остановимся на одном из направлений деятельности Конвенции – оценке экологически безопасных уровней поступлений загрязняющих веществ в экосистемы, которые в рамках Конвенции определяются термином «критическая нагрузка» (Critical Load). Согласование методов расчета критических нагрузок (далее КН), создание единой европейской базы данных, а также карт величин КН и их превышений проводятся Координационным центром по воздействиям (Coordination Centre for Effects (CCE): <http://wge-cce.org/>) и международной программой сотрудничества по моделированию и картографированию (ICP Modelling and Mapping of Critical Levels and Loads and Air Pollution Effects, Risks and Trends (ICP M&M): <http://www.icpmapping.org/>). Расчеты величин КН для территорий разных стран выполняются национальными центрами (National Focal Centers), а результаты расчетов, подготовленные в едином масштабе для специальной проекции ЕМЕП (http://www.emep.int/mscw/Grid/emep_grid.html), включаются в объединенную базу данных ICPM&M.

Основные положения методологии критических нагрузок

Базовые экологические принципы, положенные в основу методологии критических нагрузок, начали обсуждаться научным сообществом в конце 1970 годов. К этому времени уже был накоплен положительный опыт международного сотрудничества в области экологических исследований, в частности, по Программе ЮНЕСКО «Человек и биосфера». Методология КН согласуется с научными положениями отечественной школы геоэкологии и биогеохимии в критериях оценки допустимых воздействий и пороговых уровней содержания химических элементов и соединений в природных средах, учете ландшафтно-геохимических условий и использовании масс-балансового подхода при анализе процессов трансформации техногенных поллютантов в природных потоках миграции вещества (Глазовская, 1972, 1994; Ковальский, 1974; Израэль, 1975, 1984; Израэль и др., 1985; Моисеенко, 2003).

Согласно определению, термин *«критическая нагрузка»* означает количественную оценку воздействия одного или нескольких поллютантов, ниже которого, в соответствии с современным уровнем знаний, не возникает существенных вредных последствий для конкретных чувствительных элементов окружающей среды (Nilsson, Grenfield, 1988, цит. по: Протокол об ограничении выбросов окислов азота..., 1988). Таким образом, речь идет об определении экологически безопасного порога поступления загрязняющих веществ в экосистемы (в частности, с атмосферными выпадениями), при котором сохраняются благоприятные условия функционирования биоты, видовой состав и структура биоценозов. Соответственно, при уровне воздействия техногенного потока загрязняющих веществ ниже величин КН обеспечивается долговременное отсутствие негативных изменений, тогда как превышение КН является косвенным показателем экологического риска. Следует подчеркнуть, что КН – это экосистемный показатель, нормирующий «пороговое значение» величины поступления тех или иных поллютантов в экосистемы, меньше которого в их компонентах не происходит накопления загрязняющих веществ выше критических (экологически опасных) концентраций.

Важным моментом в методологии КН является определение «конкретных чувствительных элементов окружающей среды» – реципиентов или индикаторов, по состоянию или отдельным характеристикам которых судят о наличии негативного воздействия. В роли реципиентов могут выступать человек или отдельные виды биоты (например, охраняемые виды флоры и фауны, или эдификаторные виды и сообщества, или виды, играющие важную роль с позиций экосистемных услуг). Помимо биоиндикаторов, при определении КН используются и геохимические индикаторы (например, pH почв и воды, или повышенное содержание в них токсичных элементов и соединений). Это позволяет учесть специфику воздействия

одних и тех же загрязняющих веществ на разные группы реципиентов, что проявляется через разные экологические эффекты и определяется в рамках методологии КН как *эффект-ориентированный подход* (Effect Based Approach).

Известно, что неблагоприятные эффекты для живых организмов возникают при их контакте с загрязненными средами, если в них превышены экологически безопасные концентрации тех или иных поллютантов. Допустимый уровень содержания загрязняющих веществ определяется в методологии КН термином «*критические уровни*» (Critical Levels), которые являются аналогами отечественных средовых показателей ПДК и ОДК. Согласование значений критических уровней поллютантов, включенных в Конвенцию и определяемых для разных природных сред, групп реципиентов или типов экосистем на основе экспериментальных и мониторинговых данных, является важным направлением исследований международных совместных Программ Конвенции: программы комплексного мониторинга воздействий загрязнения воздуха на экосистемы (ICP Integrated Monitoring; <http://www.syke.fi/nature/icpim>), программы по оценке и мониторингу подкисления водных экосистем (ICP Waters; <http://www.icp-waters.no/>), по оценке и мониторингу воздействий загрязнения воздуха на леса (ICP Forests; <http://icp-forests.net/>) и по воздействию загрязнения воздуха на природную растительность и урожаи (ICP Vegetation; <http://icpvegetation.ceh.ac.uk/>).

Таким образом, для одной и той же экосистемы (или типа экосистем) может быть определено несколько значений КН одного и того же поллютанта, в зависимости от (i) выбранных реципиентов или (ii) критических уровней поллютантов или (iii) соответствующих разным видам экологических эффектов.

Величины КН могут быть получены на основе анализа данных мониторинговых и экспериментальных полевых исследований (так называемые, *эмпирические КН*), и одновременно были разработаны *математические методы расчета величин КН* с использованием биогеохимических моделей масс-баланса (UBA, 1996; Mapping Manual, 2004). В настоящее время в рамках Конвенции согласованы и утверждены алгоритмы расчета КН кислотообразующих и эвтрофирующих соединений, а также тяжелых металлов (Pb, Cd и Hg). Предложен, но пока не утвержден алгоритм расчета КН стойких органических соединений (Bakker, DeVries, 1996). Наиболее полная информация об эмпирических КН соединений азота дана в работе (Bobbink, Hettelingh, 2011).

Математические модели, используемые для расчета КН

Для расчетов КН используются *простые биогеохимические модели*, включающие уравнения двух типов. Первый – базовые уравнения баланса масс элементов и их соединений в почве, являющейся основной средой депонирования большинства техногенных соединений. Второй тип уравнений характеризуют интенсивность

потоков миграции элементов из почв в сопряженные среды. Подробная информация о расчетах КН дана в руководствах (UBA, 1996; Mapping Manual, 2004), в том числе, в русскоязычной версии (http://www.icpmapping.org/Mapping_Manual, далее по ссылке «Mapping Manual in Russian»).

Расчеты величин КН, выполнявшиеся национальными центрами в 1990-2000-х годах и использованные для обоснования сокращения эмиссии атмосферных поллютантов в уже принятых Протоколах, были основаны на равновесной эффект-ориентированной модели масс-баланса в почве (*Simple Mass Balance Model* (Posch et al., 1995)). Она базируется на представлении об относительном геохимическом равновесии потоков вещества, существующем между почвой и другими компонентами экосистем при постоянных внешних воздействиях. Таким образом, рассчитанные значения КН являются постоянной величиной, что не учитывает естественной динамики экосистем и климатические изменения. В модели SMB делается целый ряд допущений. Так, например, глубина рассматриваемого слоя почвы условно равняется глубине корневой зоны, что позволяет пренебречь циклом питательных веществ. Модель реализована с шагом 1 год, при этом, сезонные, межгодовые и другие краткосрочные изменения показателей в данной модели не учитываются, что позволяет использовать средние многолетние значения необходимых входных параметров. Физико-химические константы, используемые в ряде уравнений, принимаются постоянными для всего рассматриваемого слоя почвы. Модель не учитывает такие процессы, как внутривидовая конкуренция или наличие вредителей, вынос элементов с приростом той части фитомассы, которая ежегодно возвращается в почву с опадом растительности, и другие. При оценках потоков водной миграции считается, что эвапотранспирация происходит на поверхности почвы, а просачивание атмосферных осадков является постоянным по всему профилю почвы и происходит только вертикально.

В качестве примера можно привести уравнения, использующиеся в модели SMB при расчетах КН эвтрофирующих соединений азота для лесных экосистем (уравнение 1 и 2).

$$KH\ N(nutr) = N(im) + N(upt) + \frac{N(le_acc)}{1 - f(de)} \quad (1)$$

где $KH\ N(nutr)$ – критическая нагрузка питательного азота [экв.·га⁻¹·год⁻¹];

$N(im)$ – количество азота, ежегодно закрепляемого (иммобилизованного) в почве в результате образования почвенного органического вещества, [экв.·га⁻¹·год⁻¹];

$N(upt)$ – азот, аккумулированный в приросте фитомассы растительности, [экв.·га⁻¹·год⁻¹];

$N(le_acc)$ – допустимое вымывание азота из почв в почвенно-грунтовые воды [экв.·га⁻¹·год⁻¹];

$f(de)$ – коэффициент денитрификации, который определяет интенсивность потерь почвенного азота и зависит от условий увлажнения почв и наличия в них минеральных соединений азота [-].

$$N(upt) = Y \cdot [N] \quad (2)$$

где $N(upt)$ – азот, аккумулированный в приросте фитомассы растительности, [экв.·га⁻¹·год⁻¹];

Y – ежегодная продукция той части фитомассы, которая может быть удалена за пределы экосистем (для лесов – это стволовая часть древесины, [кг·га⁻¹·год⁻¹];

$[N]$ – концентрация азота в фитомассе, [экв.·кг⁻¹].

Для экологических ситуаций, когда качество природных сред и экономическая целесообразность допускают более интенсивные техногенные нагрузки (которые, однако, не должны в будущем привести к загрязнению почв и сопряженных с ними компонентов экосистем выше установленных нормативов) предлагается использовать *динамические модели*. В настоящее время разработано несколько моделей, позволяющих анализировать динамику почвенных характеристик при разных сценариях выпадений атмосферных поллютантов. Это голландская почвенная модель VSD и ее версия VSD+ (Posch et al., 2003; Posch, Reinds, 2009), шведская модель SAFE и ее версия ForSAFE-VEG (Alveteg et al., 1995; Belyazid et al., 2011), а также британская модель MAGIC (Cosby et al., 2001; Oulehle et al., 2012). Данные модели относятся к математическим динамическим моделям ионного обмена и циклов углерода и азота в почвах. Изменение химического состава почвенного раствора и динамика пулов обменных катионов имитируются, используя данные о минералогическом составе почв и регрессионные уравнения, описывающие процессы обмена между Al, H и основными катионами. Для описания кинетики разложения и трансформации органического вещества (далее ОВ), нитрификации и денитрификации в моделях используются системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка с переменными коэффициентами и поправками на температуру и влажность почвы. Минерализация азота и его иммобилизация рассчитываются в зависимости от соотношения C:N в основных пулах ОВ и корректируются в зависимости от поступления азота с атмосферными выпадениями и возможного вымывания

нитратов с почвенно-грунтовым стоком. Все модели реализуются с временным шагом один год.

Помимо прочего, использование рассматриваемых динамических моделей позволяет оценить период времени, за который концентрация поллютантов или другие почвенные характеристики достигнут критического уровня при той или иной интенсивности выпадений и в зависимости от природно-климатических условий конкретных регионов. Также, подобные модели могут использоваться для анализа изменений почвенных параметров в результате снижения атмосферных нагрузок кислотообразующих и эвтрофирующих соединений. Версии моделей VSD и VSD+ находятся в открытом доступе (http://wge-cce.org/Methods_Data/The_VSD_suite_of_models).

Карты критических нагрузок и их превышений

Для целей Конвенции пространственная «привязка» входных данных моделей расчета КН и визуализация результатов выполняются с использованием картографической модели (проекции) ЕМЕР, которая «разбивает» всю территорию Европы (включая Европейскую часть РФ) на сеть условных квадратов размером $150 \times 150 \text{ км}^2$ или $50 \times 50 \text{ км}^2$ (http://www.emep.int/mscw/Grid/emep_grid.html). При этом каждому квадрату должно соответствовать одно значение КН конкретного поллютанта (рис. 1).

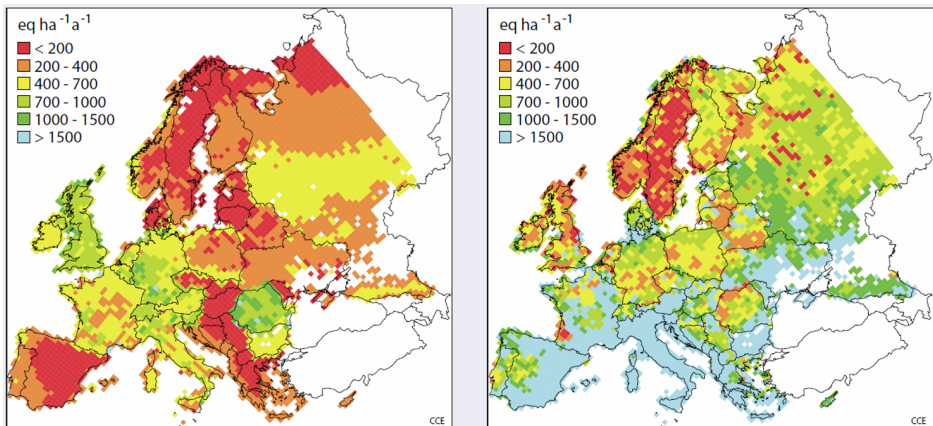


Рисунок 1 – Пример карт величин КН эвтрофирующих (слева) и кислотообразующих (справа) соединений (CCE Status Report, 2008).
Единицы измерения величин КН – экв.·га⁻¹·год⁻¹.

Но, как правило, в пределах территорий такого масштаба выделяется несколько типов экосистем, которые характеризуются разной степенью устойчивости к воздействию загрязняющих веществ.

При обосновании результирующей величины КН обычно используют принцип 95-ти % защищенности, который означает, что данная величина КН обеспечивает сохранность экосистем, чья совокупная площадь составляет не менее 95% от общей площади соответствующего квадрата ЕМЕП.

Метеорологическими Синтезирующими Центрами ЕМЕП в той же сетке проекции выполняются модельные оценки интенсивности выпадений поллютантов, что позволяет на основе сравнительного анализа данных по выпадениям и величин КН оценить вероятность превышений допустимых уровней поступления загрязняющих веществ (*превышения КН*) и определить территории, где необходимо снижение техногенных воздействий. Как следует из результатов оценки превышений КН кислотообразующих соединений, к 2000 г. в Европе существенно сократились экологические риски для природных экосистем, связанные с выпадением кислотных осадков (рис. 2).

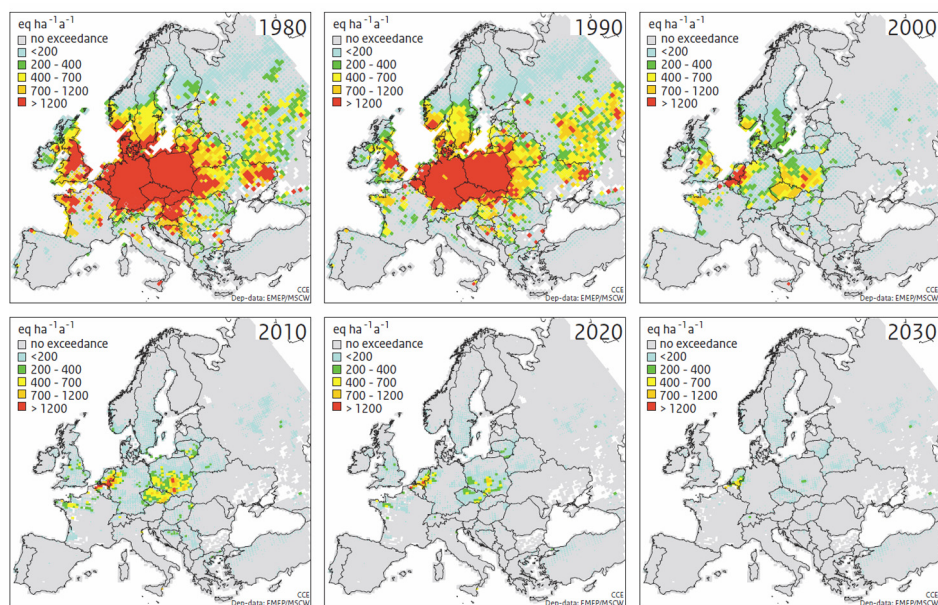


Рисунок 2 – Пример ретроспективных и прогнозных карт превышения КН кислотообразующих соединений (CCE Status Report, 2012). Единицы измерения величин КН – экв.·га⁻¹·год⁻¹; «no exceedance» – нет превышений КН.

В тоже время, антропогенная эмиссия соединений азота продолжает оставаться достаточно высокой, определяя повышенные риски эвтрофирования природных экосистем на территории большинства европейских стран не только в настоящее время, но и в ближайшее десятилетие (рис. 3).

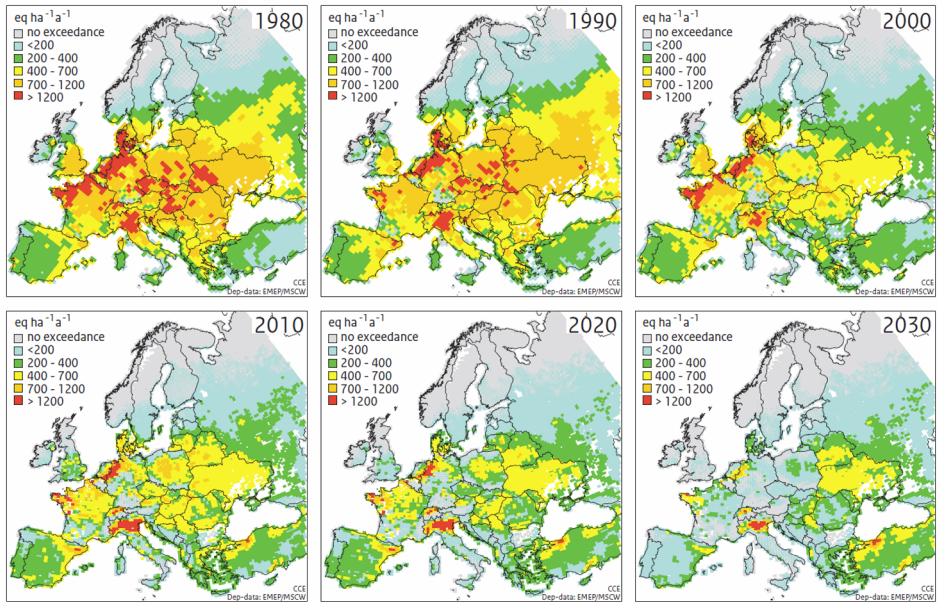


Рисунок 3 – Пример ретроспективных и прогнозных карт превышения КН эвтрофирующих соединений (CCE Status Report, 2012). Единицы измерения величин КН – экв.·га⁻¹·год⁻¹; «no exceedance» – нет превышений КН.

Опыт использования методологии КН для оценки допустимых антропогенных воздействий на природные экосистемы в РФ

В 1990-х годах функции российского национального центра (далее НЦ) были возложены на Всероссийский научно-исследовательский институт охраны природы (ВНИИ Природа), подведомственный МПР России. Соисполнителем работ по расчету КН, начиная с 1993 г., был Институт почвоведения и фотосинтеза РАН (ныне ФГБУН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН). В соответствии с обязательствами РФ по Конвенции, в 1990-2000-х годах были выполнены расчеты величин КН кислотообразующих и эвтрофирующих соединений и тяжелых металлов (Pb и Cd) для европейской территории РФ с детальностью пространственного разрешения 150×150 км и 50×50 км (Башкин и др., 1998; CCE Status Report, 1991, 1993, 1995; Hettelingh et al., 2002; Priputina et al., 2007). Результаты этих расчетов опубликованы в Национальном Атласе России (2007). Одновременно, российский НЦ был ответственным за методическое обеспечение расчетов КН в странах СНГ. В рамках этой деятельности было организовано несколько субрегиональных совещаний в Москве, Пуцино, Минске и других городах (Calculation and Mapping..., 1999; Sliggers, Kakebeeke, 2004; Subregional meeting, 2004; и др.). Кроме того, были выполнены исследования, в которых подтверждена применимость

методик расчета КН тяжелых металлов (Pb и Cd) для ландшафтных условий и почв европейской части России (Pampura et al., 2007). Методики расчета КН подкисляющих соединений были апробированы для пресноводных экосистем территории РФ (Моисеенко, 2002, 2005).

После 2008 года из-за организационно-финансовых проблем деятельность НЦ по расчету и картографированию КН была приостановлена, а участие РФ в этом направлении Конвенции ограничилось участием отечественных специалистов в качестве экспертов в совещаниях, организуемых Рабочей группой по воздействиям и программой сотрудничества по моделированию и картографированию, где обсуждаются научно-методические вопросы оценки КН и их превышений. В настоящее время РФ не предоставляет официальных данных на запросы Координационного центра по воздействиям (так называемые Call for Data) и не участвует в ежегодных отчетах национальных центров, несмотря на неоднократные обращения руководства Координационного центра в МПР России легализовать статус российского НЦ и поддержать его деятельность. Как следствие, в периодически обновляемой общеевропейской базе данных КН для территории РФ используются величины КН, рассчитанные в Координационном центре по воздействиям в Нидерландах, которые не всегда согласуются с оценками, выполненными нашими специалистами на основе отечественных источников данных.

В тоже время, методология КН, первоначально не нашедшая широкой поддержки у российских геоэкологов (Глазовская, 1994), за прошедшие годы была успешно использована в ряде отечественных региональных исследований. В работах В.Н. Башкина с соавторами (Bashkin et al., 1995) и М.Ю. Семенова (2002) выполнены оценки величин КН кислотообразующих соединений для наземных экосистем азиатской части РФ. В исследованиях Г.Н. Копчик (2004) расчеты величин КН кислотообразующих соединений и ТМ применены для оценки устойчивости лесов Кольского полуострова к воздействию выбросов Мончегорского медно-никелевого комбината. Выполнены расчеты КН серы и азота для наземных экосистем в районах расположения российских станций ЕМЕП (Рябошапко и др., 2007). Для основных типов лесов Подмоскovie проведены расчеты величин КН эвтрофирующих соединений азота (Припутина и др., 2012). На примере г. Москвы методология КН была использована для оценки допустимых уровней воздействия атмосферных поллютантов на различные функциональные зоны урбанизированных территорий (Башкин и др., 2006).

Следует подчеркнуть перспективность методологии КН для целей экологического мониторинга, оценки воздействий на окружающую среду в рамках проектной документации крупных производственных проектов (ОВОС) и при анализе экологических рисков в

связи с возрастанием техногенной эмиссии атмосферных поллютантов и их выпадений. Это связано с тем, что принципы расчета величин КН в целом соответствуют определению нормативов допустимого воздействия на окружающую среду, данному в Федеральном законе «Об охране окружающей среды». Согласно закону, это нормативы, которые установлены в соответствии с показателями воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду, и при которых соблюдаются нормативы качества окружающей среды» (Цитата по: Федеральный закон от 10.01.2002 №7-ФЗ «Об охране окружающей среды», Глава 1. Статья 1. <http://www.rg.ru/2002/01/12/oxranasredy-dok.html>). Таким образом, на законодательном уровне подчеркивается необходимость единства двух групп нормативов: нормативов качества окружающей среды (ПДК, ОДК и других средовых показателей), и нормативов допустимого воздействия на окружающую среду (которые в отечественном природоохранном законодательстве пока разработаны слабо). Расчет величин КН и их превышений для экосистем разного иерархического уровня существенно дополняет результаты экологического мониторинга, позволяя выполнять разномасштабные экологические оценки влияния хозяйственной деятельности на состояние окружающей среды с учетом тех или иных природоохранных приоритетов. В качестве примера можно привести опыт расчета КН эвтрофирующих соединений для прогнозной оценки экологических рисков, связанных с влиянием техногенной эмиссии оксидов азота на природные экосистемы в районах газодобычи и транспортировки природного газа (Припутина и др., 2006; Башкин и др., 2009; Башкин, Припутина, 2010). О востребованности методологии КН в современной практике экологических исследований свидетельствует включение базовой информации о принципах и методах расчета КН в учебные курсы подготовки специалистов экологического направления в ряде ВУЗов страны (Толпешта, 2014).

В то же время, следует отметить необходимость более широкого и всестороннего обсуждения вопросов использования методологии КН российскими специалистами с целью адаптации методов расчета КН к особенностям природных условий РФ и с учетом специфики имеющихся национальных данных. Это могло бы способствовать легализации КН как показателей допустимого воздействия на окружающую среду на нормативно-правовом уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башкин В.Н., Козлов М.Я., Припутина И.В., Абрамичев А.Ю. 1998. Количественная оценка и картографирование критических нагрузок серы и азота на наземные и пресноводные экосистемы Европейской части России. – Проблемы региональной экологии, № 1, с. 26-42.

Башкин В.Н., Припутина И.В., Дмитриев В.В. 2006. Нормирование воздействия поллютантов на экосистемы урбанизированных территорий. – Использование и охрана природных ресурсов в России. № 5. с. 64-70.

Башкин В.Н., Припутина И.В., Маклюк О.В., Танканаг А.В. 2009. Экологическое обоснование региональных нормативов допустимых воздействий атмосферных поллютантов для наземных экосистем на основе процедур оценки риска. – Наука и техника в газовой промышленности. № 2, с. 33-40.

Башкин В.Н., Припутина И.В. 2010. Управление экологическими рисками при эмиссии поллютантов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ. 186 с.

Глазовская М.А. 1972. Технобиогеоомы – исходные физико-географические объекты ландшафтно-геохимического прогноза. – Вестник МГУ, сер. 5 (географ.). № 6, с. 23-35.

Глазовская М.А. 1994. Качественные и количественные оценки сенсорности и устойчивости природных систем к техногенным кислотным воздействиям. – Почвоведение. № 1, с. 134-139.

Израэль Ю.А. 1975. Комплексный анализ окружающей среды. Подходы к определению допустимых нагрузок на окружающую среду. В кн.: Всесторонний анализ окружающей природной среды. – Л.: Гидрометеиздат. с. 17-25.

Израэль Ю.А. 1984. Экология и контроль состояния природной среды. – М.: Гидрометеиздат, 560 с.

Израэль Ю.А., Филлипова Л.М., Инсаров Г.Э., Семевский Ф.Н., Семенов С.М. 1985. К проблеме оценки и прогноза изменений состояния экосистем. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том VIII. – Л.: Гидрометеиздат, с. 9-26.

Ковальский В.В. 1974. Геохимическая экология. – М.: Наука. 326 с.

Копчик Г.Н. 2004. Устойчивость лесных почв к атмосферному загрязнению. – Лесоведение. № 4. с. 61-71.

Моисеенко Т.И. 2002. Определение критических нагрузок кислотных выпадений для поверхностных вод. – Водные ресурсы. Т. 29, № 3. с. 350-356.

Моисеенко Т.И. 2003. Антропогенная изменчивость пресноводных экосистем и критерии оценки качества вод. – В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 19. с. 72-94.

Моисеенко Т.И. 2005. Теория критических нагрузок и ее приложение к определению воздействия загрязняющих веществ на поверхностные воды Севера. – Труды Карельского НЦ РАН. Т. 1. с. 337-342.

Национальный Атлас России. 2007. Т. 2. Природа и экология. – М.: Роскартография. с. 421-424.

Припутина И.В., Башкин В.Н., Казак А.С., Горлов Д.В. 2006. Биогеохимические подходы к оценке устойчивости экосистем в зонах воздействия системы газопроводов «Средняя Азия – Центр». – Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. № 2. с. 102-109.

Припутина И.В., Аверкиева И.Ю., Танканаг А.В. 2012. Применение метода Монте-Карло в оценках допустимых воздействий атмосферных поллютантов на лесные экосистемы. – Математическая биология и биоинформатика, Т. 7, № 1, с. 322-333. doi: 10.17537/2012.7.322.

Протокол об ограничении выбросов окислов азота или их трансграничных потоков к Конвенции 1979 года о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (русская версия текста). 1988. URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/azot.pdf

Рябашапко А.Г., Брюханов П.А., Брускина И.М. 2007. Мониторинг атмосферного переноса загрязняющих веществ на территории Центрально-лесного биосферного заповедника. Заповедники России и устойчивое развитие. Материалы конференции. Труды Центрально-лесного государственного биосферного заповедника. Выпуск 5. – Великие Луки. с. 354-362.

Семенов М.Ю. 2002. Критические нагрузки подкисляющих соединений на наземные экосистемы Азиатской части России. – Новосибирск: Наука. 314 с.

Толпешта И.И. 2014. Методологические подходы к расчету критических нагрузок на экосистемы соединений серы и азота. Учебно-методическое пособие. – Тула: ЗАО «Аквариус». 128 с.

Agren C. 2000. Transboundary Air Pollution: The profit potential of further reductions. Stockholm, Sweden. The Swedish Environmental Protection Agency. URL: <http://www.eolss.net/sample-chapters/c14/e1-44-02-08.pdf>.

Alveteg M., Sverdrup H., Warfvinge P. 1995. Regional assessment of the temporal trends in soil acidification in southern Sweden, using the SAFE model. Water, Air and Soil Pollution. V. 85. pp. 2509-2514.

Bakker D.J., W. De Vries. 1996. Manual for calculating critical loads of persistent organic pollutants for soils and surface waters. TNO-MEP report 96/509, The Netherlands.

Bashkin V.N., Kozlov M.Y., Priputina I.V., Abramychiev A.Y., Dedkova I.S. 1995. Calculation and mapping of critical loads of S, N and acidity on ecosystems of the Northern Asia. – Water, Air, and Soil Pollution. V. 85. pp. 2395-2400.

Bobbink R., Hettelingh J.-P. (eds.). 2011. Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships. RIVM report 680359002. Bilthoven, the Netherlands. URL: <http://www.b-ware.eu/sites/default/files/publicaties/Review-revision-empirical-critical-loads-2011.pdf>.

Belyazid S., Kurz D., Braun S., Sverdrup H., Rihm B., Hettelingh J.-P. 2011. A dynamic modelling approach for estimating critical loads of nitrogen based on plant community changes under a changing climate. – *Environmental Pollution*. V. 159. pp. 789-801.

Calculation and Mapping of Critical Loads for Air Pollutants Relevant to the UN ECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. 1999. Proceedings of the Second training workshop, Pushchino, Russia, 27 September – 2 October, 1999., Moscow: POLTEX. 132 p.

CCE Status Report. 1991: Hettelingh J.-P., Downing R.J., de Smet P.A.M. (eds.). 1991. Mapping critical loads for Europe. RIVM report No. 259101001. Bilthoven, the Netherlands. URL: http://wgecce.org/Publications/CCE_Status_Reports/Status_Report_1991.

CCE Status Report. 1993: Posch M., Hettelingh J.-P., Sverdrup H., Bull K., De Vries W. (eds.). Calculation and Mapping of Critical Loads in Europe. RIVM Report 259101003. Bilthoven, the Netherlands. URL: http://wgecce.org/Publications/CCE_Status_Reports/Status_Report_1993.

CCE Status Report. 1995: Posch M., de Smet P.A., Hetteling J.-P., Downing R. (eds.). Calculation and mapping of critical thresholds in Europe. RIVM Report № 59101004. Bilthoven, the Netherlands. URL: http://wgecce.org/Publications/CCE_Status_Reports/Status_Report_1995.

CCE Status Report. 2008: Hettelingh J.-P., Posch M., Slootweg J. (eds.). 2008. Critical Load, Dynamic Modelling and Impact Assessment in Europe. RIVM report № 500090003. Bilthoven, the Netherlands. URL: http://wgecce.org/Publications/CCE_Status_Reports/Status_Report_2008.

CCE Status Report. 2012: Posch M., Slootweg J., Hettelingh J.-P. (eds.). 2012. Modelling and Mapping of Atmospherically-induced Ecosystem Impacts in Europe. RIVM report № 680359004. Bilthoven, the Netherlands. URL: http://wgecce.org/Publications/CCE_Status_Reports/Status_Report_2012.

Cosby B.J., Ferrier R.C., Jenkins A., Wright R.F. 2001. Modelling the effects of acid deposition: refinements, adjustments and inclusion of nitrogen dynamics in the MAGIC model. *Hydrology and Earth System Sciences*. V. 5. pp. 499-517.

Hettelingh J.-P., Slootweg J., Posch M., Dutchak S., Ilyin I. (eds.) 2002. Preliminary modelling and mapping of critical loads of cadmium and lead in Europe. RIVM Report 259101011/2002. Bilthoven, The Netherlands. 127 p.

Mapping Manual, 2004: Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. 2004. URL: http://icpmapping.org/Mapping_Manual.

Nilsson J., Grennfelt P. (eds.) 1988. Critical loads for sulphur and nitrogen. Report from a workshop held at Skokloster. Sweden 19-24 March 1988. Miljörapport 15. 418 p.

Oulehle F., Cosby B.J., Wright R.F., Hruška J., Kopáček J., Krám P., Evans C.D., Moldan F. 2012. Modelling soil nitrogen: the MAGIC model with nitrogen retention linked to carbon turnover using decomposer dynamics. *Environmental Pollution*. V. 165. pp. 158-166. doi: 10.1016/j.envpol.2012.02.021.

Pampura T., Groenenberg J.E., Loftis S., Pripulina I. 2007. Validation of transfer functions predicting Cd and Pb free metal ion activity I soil solution as a function of soil characteristics and reactive metal content. *Water, Air and Soil Pollution*. V. 184. pp. 217-234. doi: 10.1007/s11270-007-9410-4.

Posch M., De Smet P.A.M., Hettelingh J.-P., Downing R.J. (eds.). 1995. Calculation and Mapping of Critical Thresholds in Europe: CCE Status report 1995. RIVM Report No 259101004. Bilthoven, The Netherlands.

Posch M., Hettelingh J.-P., Slootweg J., Downing R.J. (eds.) 2003. Modelling and Mapping of Critical Thresholds in Europe. CCE Status Report 2003, RIVM Report 259101013, Bilthoven, The Netherlands, pp. 37-44.

Posch M., Reinds G.J. 2009. A very simple dynamic soil acidification model for scenario analyses and target load calculations. *Environmental Modelling and Software* V. 24, No 3, pp. 329-340.

Pripulina I., Abramychiev A., Tankanag A. 2007. New dataset and results of calculating critical loads for forest ecosystems of European Russia // The 7th Sub-regional workshop of effect-oriented activities under Convention on LRTAP. Sept. 28 Oct. 1, 2006, Baia-Mare, Romania. Cluj-Napoca: RISOPRINT. pp. 79-90.

Sliggers J., Kakebeeke W. 2004. Clearing the air: 25 years of the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. United Nations, Geneva. ISBN 92-1-116910-0.

Subregional meeting, 2004: Proceedings of the 6th Subregional meeting on Effect-Oriented Activities in the Countries of Eastern and South-Eastern Europe relevant for the Un ECE Convention on LRTAP. 2004. Moscow-Pushchino, September 16-18, 2004. Smolensk: Magenta Publ. House. 128 p.

Tørseth K., Aas W., Breivik K., Fjæraa A.M., Fiebig M., Hjellbrekke A.G., Lund Myhre C., Solberg S., Yttri K.E. 2012. Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972-2009. *Atmos. Chem. Phys.*, V. 12, pp. 5447-5481. <http://www.atmos-chem-phys.net/12/5447/2012/acp-12-5447-2012.htm>.

UBA, 1996: Manual on methodologies and criteria for mapping critical levels/loads and geographical areas where they are exceeded. Text 71/96. Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Germany, Berlin.