

**Европейская экономическая комиссия**

Исполнительный орган по Конвенции  
о трансграничном загрязнении воздуха  
на большие расстояния

**Рабочая группа по стратегиям и обзору****Пятьдесят восьмая сессия**

Женева, 14–17 декабря 2020 года

Пункт 3 предварительной повестки дня

**Ход осуществления плана работы на 2020–2021 годы****Исполнительный орган Конвенции  
о трансграничном воздухе  
на большие расстояния****Сороковая сессия**

Женева, 17–18 декабря 2020 года

Пункт 4 b) предварительной повестки дня

**Обзор осуществления плана работы  
на 2020–2021 годы: политика****Проект руководящего документа по комплексному  
устойчивому управлению азотом****Сельское хозяйство, продовольствие и окружающая среда****Представлен Целевой группой по химически активному азоту***Резюме*

Проект руководящего документа по комплексному устойчивому управлению азотом был подготовлен Целевой группой по химически активному азоту в соответствии с пунктом 2.2.3 плана работы по осуществлению Конвенции на 2020–2021 годы (ECE/EB.AIR/144/Add.2). В долгосрочной стратегии Конвенции на 2020–2030 годы и последующий период (ECE/EB.AIR/142/Add.2, решение 2018/5) было отмечено, что нарушение азотного цикла является одной из наиболее серьезных проблем для экологической политики, требующей комплексного подхода (пункты 68 и 79 d)). Цель настоящего документа заключается в мобилизации усилий Сторон по борьбе с загрязнением из сельскохозяйственных источников в контексте полного азотного цикла на основе комплексного подхода, позволяющего получить многочисленные сопутствующие выгоды в результате совершенствования управления азотом. Документ, в частности, направлен на содействие осуществлению Протокола по борьбе с подкислением, эвтрофикацией и приземным озоном.

Настоящий документ выносится на рассмотрение Рабочей группы по стратегиям и обзору. Ожидается, что окончательный проект будет затем препровожден Исполнительному органу для принятия на его текущей сессии.



## Содержание

	<i>Стр.</i>
Сокращения .....	4
I. Краткий обзор для директивных органов	
Связанные с азотом возможности для сельского хозяйства, продовольствия и окружающей среды .....	7
A. Справочная информация .....	8
B. Цели руководящего документа .....	10
C. Основные тезисы руководящего документа.....	14
D. Справочная литература .....	18
II. Технический обзор	
Интеграция принципов и мер для устойчивого управления азотом в агропродовольственной системе.....	20
A. Принципы комплексного устойчивого управления азотом .....	21
B. Содержание животных в помещениях, хранение и переработка навоза .....	29
C. Внесение в почву органических и неорганических удобрений, в том числе навоза, мочи, а также других органических веществ .....	39
D. Землепользование и управление ландшафтом .....	46
E. Общие приоритеты для разработчиков политики .....	50
F. Приоритеты для практических работников сельского хозяйства .....	59
III. Принципы комплексного устойчивого управления азотом .....	61
A. Введение и справочная информация .....	61
B. Аспекты комплексного устойчивого управления азотом .....	62
C. Ключевые положения, касающиеся круговорота азота .....	65
D. Принципы комплексного устойчивого управления азотом в сельском хозяйстве .....	70
E. Инструменты реализации комплексных подходов к управлению азотом .....	80
F. Выводы и рекомендации .....	82
G. Справочная литература .....	84
IV. Содержание сельскохозяйственных животных в помещении, хранение и переработка навоза .....	89
A. Введение и справочная информация .....	89
B. Подход к описанию мер по борьбе с загрязнением .....	93
C. Кормление сельскохозяйственных животных .....	93
D. Содержание сельскохозяйственных животных в помещениях .....	98
E. Хранение, обработка и переработка навоза .....	113
F. Передовая практика и приоритетные меры .....	132
G. Выводы и вопросы для дальнейших исследований .....	133
H. Справочная литература .....	137

V.	Применение органических и неорганических удобрений .....	142
A.	Введение и справочная информация .....	142
B.	Поступление азота в почву сельскохозяйственных угодий .....	143
C.	Потери азота из почвы .....	147
D.	Руководящие принципы .....	148
E.	Меры по борьбе с загрязнением .....	149
F.	Приоритеты для директивных органов .....	173
G.	Приоритеты для специалистов-практиков .....	174
H.	Выводы и вопросы для дальнейших исследований .....	174
I.	Руководящие документы .....	175
J.	Справочная литература .....	176
VI.	Землепользование и управление ландшафтом .....	179
A.	Введение и предыстория .....	179
B.	Зачем делать акцент на землепользовании и управлении ландшафтом? .....	179
C.	Практические последствия землепользования и управления ландшафтом .....	180
D.	Основные проблемы с сокращением выбросов биогенного азота через землепользование и управление ландшафтом .....	182
E.	Интеграция аспектов влияния на воду, почву, воздух и климат .....	185
F.	Приоритеты для директивных органов .....	189
G.	Меры по смягчению последствий на уровне землепользования и управления ландшафтом .....	190
H.	Приоритеты для фермеров и других специалистов-практиков .....	207
I.	Резюме выводов и рекомендаций .....	209
J.	Справочная литература .....	212
VII.	Разработка пакетов мер по комплексному устойчивому управлению азотом .....	219
A.	Введение .....	219
B.	Практические примеры .....	220
C.	Соображения по поводу разработки пакетов мер .....	227
D.	Дополнительные руководящие документы .....	228
E.	Глоссарий основных терминов .....	229

## Сокращения

ЭБЗ	эффективность борьбы с загрязнением
НА	нитрат аммония
НИМ	наилучшая имеющаяся технология
НМУ	наилучшие методы управления
BSP	передовая системная практика
БФА	биологическая фиксация азота
С	углерод
С/N	соотношение углерода и азота
CAN	нитрат кальция-аммония
АЗВ	анализ затрат и выгод
CDU	кротонилидендикарбамид
CH <sub>4</sub>	метан
CO <sub>2</sub>	диоксид углерода
СП	сырой протеин
DCD	дициандиамид, ингибитор нитрификации
СВ	сухое вещество
DMPP	3,4-диметилпиразол фосфат — ингибитор нитрификации
POУ	растворенный органический углерод
РОА	растворенный органический азот
ДНСВР	драйвер — нагрузка — состояние — воздействие — реакция
ЕЭК	Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций
ЕОА	Европейская оценка по азоту
ЕС	Европейский союз
ЕС-28	Бывшая группа из 28 стран Европейского союза, ныне ЕС-27
ФАО	Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций
СН	стойловый навоз
ГЭФ	Глобальный экологический фонд
ПГ	парниковый газ
GPS	Глобальная система позиционирования
H <sub>2</sub> O	водоснабжение
ХЕЛКОМ	Хельсинкская комиссия по защите морской среды Балтийского моря
HNO <sub>3</sub>	азотная кислота
IBDU	изобутилидендикарбамид
МККМА	Межконвенционный координационный механизм по азоту
МСУА	Международная система управления азотом — осуществляется в рамках проекта ГЭФ/Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде «На пути к МСУА»

МГЭИК	Межправительственная группа экспертов по изменению климата
К	калий
КТЗВБР	Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (Конвенция по воздуху)
N	азот
N <sub>2</sub>	диазот — газ без цвета и запаха, из которого примерно на 78 % состоит атмосфера Земли
N <sub>2</sub> O	закись азота — мощный парниковый газ
НКА	национальный кодекс по аммиаку
НВРТ	N-(n-бутил) тиофосфорный триамид — ингибитор уреазы
НПО	неправительственная организация
NH <sub>3</sub>	аммиак — загрязнитель воздуха и воды, а также первичная форма азота в биологических системах
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	аммоний — присутствует в биологических системах и почвах, образуя загрязнители в атмосферных ТЧ и водных системах
NH <sub>x</sub>	общий аммиачный азот — иногда называемый TAN
NI	ингибитор нитрификации
NO	оксид азота — загрязнитель тропосферы
NO <sub>2</sub>	диоксид азота — загрязнитель тропосферы
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	нитрит
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	нитрат — присутствует в качестве вторичного загрязнителя в атмосферных ТЧ и эвтрофицирующего загрязнителя водных систем
NO <sub>x</sub>	оксиды азота — комбинация NO и NO <sub>2</sub>
N <sub>орг</sub>	органический азот
НРК	азот, фосфор и калий в комбинации
N <sub>r</sub>	химически активный азот — термин используется для обозначения различных азотных соединений, которые прямо или косвенно способствуют росту живых организмов, в отличие от N <sub>2</sub> , который является инертным
ЭИА	эффективность использования азота — обычно определяется как отношение содержания азота в выходной продукции к содержанию вводимого азота. Может рассчитываться для различных систем, таких как растениеводство, животноводство, пищевая цепочка и вся экономика в целом
O <sub>3</sub>	озон
ОЭСР	Организация экономического сотрудничества и развития
P	фосфор
PM	твердые частицы — включают в себя NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> и NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> в качестве основных компонентов. PM <sub>10</sub> и PM <sub>2,5</sub> — атмосферные твердые частицы (PM) диаметром менее 10 и 2,5 микрометра соответственно
R-NH <sub>2</sub>	органические соединения азота
S	сера
СЭО	стратегическая экологическая оценка

Si	кремний
SO <sub>2</sub>	диоксид серы
TAN	общий аммиачный азот
ЦГРМКО	Целевая группа по разработке моделей для комплексной оценки Конвенции ЕЭК Конвенции ЕЭК ООН о трансграничном загрязнении воздуха
ЦГБА	Целевая группа по биогенному азоту Конвенции ЕЭК ООН по воздуху
TN	общий азот
UAN	мочевино-аммониевый нитрат
ЕЭК ООН	Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций
ЮНЕП	Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде
РКИКООН	Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата
ЛОС	летучие органические соединения
РГСО	Рабочая группа по стратегиям и обзору Конвенции ЕЭК ООН о трансграничном загрязнении воздуха
ВОЗ	Всемирная организация здравоохранения
Zn	цинк

## I. Краткий обзор для директивных органов

### Связанные с азотом возможности для сельского хозяйства, продовольствия и окружающей среды

#### Цели и контекст

Комплексное устойчивое управление азотом дает возможность увязать многочисленные преимущества более эффективного использования азота (N) с точки зрения окружающей среды, экономики и здравоохранения, помогая избежать политических компромиссов при одновременном обеспечении максимального синергетического эффекта.

Демонстрация значительного выигрыша по многим направлениям, которые дает принятие мер по управлению азотом, должна придать импульс усилиям для осуществления преобразований и будет способствовать прогрессу в достижении многих целей Организации Объединенных Наций в области устойчивого развития.

Настоящий документ был подготовлен под руководством Конвенции Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН) о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха) в рамках ее работы по сокращению воздействия загрязнения воздуха, в том числе в результате подкисления, эвтрофикации, увеличения концентраций приземного озона и твердых частиц (PM), поскольку они оказывают воздействие на здоровье человека, биоразнообразие и экономику.

Принятие мер в отношении азота дает многочисленные сопутствующие выгоды, особенно для смягчения последствий изменения климата, стратосферного озона и охраны водных ресурсов, включая грунтовые воды, реки, озера, прибрежные зоны и, в более широком смысле, морскую среду.

В подготовке настоящего руководящего документа также приняла участие Международная система управления азотом (МСУА), обеспечивающая поддержку в разработке Межконвенционного координационного механизма по азоту (МККМА) в партнерстве с Программой Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП), Глобальным экологическим фондом (ГЭФ) и Международной инициативой по азоту.

#### Основные моменты

Азот играет ключевую роль в качестве важнейшего питательного вещества для производства продуктов питания, клетчатки и биотоплива. Однако, если рассматривать весь цикл круговорота азота от удобрения до потребления человеком и отходов, то эффективность его использования очень низка.

Следует различать химически инертный атмосферный молекулярный азот ( $N_2$ ) и активные формы азота ( $N_r$ ), которые представляют собой ценный ресурс. Около 80 % антропогенного  $N_r$  не используется и поступает в биосферу в виде загрязнения воздуха и воды и путем преобразования обратно в  $N_2$  в процессе денитрификации.

Настоящий руководящий документ посвящен сельскому хозяйству в контексте продовольственной системы и включает конкретную информацию о принципах и мерах, которые позволяют сократить выбросы в атмосферу аммиака ( $NH_3$ ), оксидов азота ( $NO_x$ ), закиси азота ( $N_2O$ ) и  $N_2$ , а также выщелачивание нитратов ( $NO_3^-$ ) и других  $N_r$  в воду и общие потери азота.

С учетом 10 ключевых моментов, лежащих в основе круговорота азота, настоящий руководящий документ отражает 24 принципа комплексного устойчивого управления азотом. В нем определены 76 конкретных мер по улучшению управления азотом, повышению эффективности использования азота и сокращению потерь, загрязняющих окружающую среду.

В настоящем руководящем документе дается описание: 5 мер, касающихся режима кормления животных; 18 мер в области содержания животных; 12 мер в области хранения/переработки навоза; 5 мер, относящихся к рекуперации питательных веществ; 20 мер, касающихся внесения в почву органических и неорганических удобрений; и 16 мер в области землепользования и управления ландшафтом.

Параллельное обсуждение основных принципов будет способствовать активизации разработки будущих стратегий в области борьбы с загрязнением окружающей среды и устойчивого развития, а также разработке согласованных «пакетов мер», обеспечивающих максимальный симбиотический эффект.

## A. Справочная информация

1. С тех пор, как были одомашнены первые сельскохозяйственные растения и животные, развитие цивилизации было неразрывно связано с изменением человеком естественного азотного цикла. Выращивание сельскохозяйственных культур и ведение животноводства требуют мобилизации азота (N) и других питательных веществ, которые затем транспортируются в виде продовольствия, кормов и волокон в деревни, поселки и города (Lassaletta and others, 2014). Тысячелетиями азотфиксирующие культуры и навоз использовались для повышения продуктивности сельскохозяйственных культур (например, Columella, *On Agriculture* 2.13.1, trans. Boyd Ash, 1941), при этом в течение последних 200 лет применяются методы мобилизации дополнительных количеств азота, в том числе за счет добываемых ресурсов (например, гуано, селитра, перегонка угля), и, наконец, в XX веке — за счет синтеза неорганических удобрений непосредственно из атмосферного молекулярного азота (N<sub>2</sub>) (Sutton and others, 2011). По мере увеличения масштабов антропогенного изменения азотного цикла усиливаются и последствия этого изменения. Неорганические азотные удобрения (включая синтетическую мочевины) позволили значительно увеличить производство продовольствия и кормов во многих регионах, что привело к значительному росту населения и поголовья животных (Erismann and others, 2008), при этом во многих районах региона ЕЭК ООН потребление продуктов животного происхождения человеком превышает его физиологические потребности (Westhoek and others, 2014, 2015; Springmann and others, 2018).

2. Эта трансформация глобального азотного цикла, особенно за последнее столетие, привела к возникновению целого комплекса проблем загрязнения, связанных с тем, что производство и использование человеком азотных соединений приводит к многочисленным экологическим угрозам. В сочетании с азотными соединениями, образующимися в процессе горения, и соединениями, которые мобилизуются через сточные воды, загрязнение азотом в настоящее время затрагивает все экологические среды на всей планете.

3. До недавнего времени усилия по борьбе с загрязнением азотом носили в основном бессистемный характер. Это было главным образом обусловлено отсутствием координации экологической политики, управления и научных исследований между различными экологическими средами и такими проблемами, как загрязнение воздуха, загрязнение воды, выбросы парниковых газов (ППГ), истощение озонового слоя стратосферы, утрата биоразнообразия и защита почв. Каждая из этих проблем зависит от загрязнения азотом, которое, таким образом, является связующим звеном между многими вопросами, касающимися окружающей среды, экономики, здоровья и благосостояния. Традиционная фрагментация политики между этими проблемами тормозит прогресс в достижении целей политики, снижая согласованность действий на местном, национальном и международном уровнях по всему азотному циклу, что чревато риском компромиссов, которые могут заблокировать перемены (Oenema and others, 2011a и 2011b).

4. Более глубокое понимание механизмов, через которые азот связывает все эти проблемы, сегодня открывает широкие возможности в сфере выработки политики для

реализации изменений. Комплексный подход на всех этапах азотного цикла поможет определить степень взаимосвязанности между загрязнением воздуха, загрязнением воды, изменением климата, истощением озонового слоя стратосферы, утратой биоразнообразия, здоровьем и экономикой (Oenema and others, 2011b; Sutton and others, 2013, 2019; Zhang and others, 2015; Leip and others, 2015; Kanter and others, 2020).

5. ЕЭК ООН уже давно является лидером в разработке таких комплексных подходов. К ним относится Протокол по борьбе с подкислением, эвтрофикацией и приземным озоном (Гётеборгский протокол, подписанный в 1999 году и пересмотренный в 2012 году) к Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха) (ЕЭК ООН, 1999 год). Пересмотренный протокол вступил в силу 7 октября 2019 года. Гётеборгский протокол устанавливает предельные уровни для ограничения выбросов диоксида серы (SO<sub>2</sub>), оксидов азота (NO<sub>x</sub>) и аммиака (NH<sub>3</sub>) до 2020 года, а также предусматривает национальные обязательства по сокращению выбросов SO<sub>2</sub>, летучих органических соединений (ЛОС), твердых частиц (PM), NO<sub>2</sub> и NH<sub>3</sub> начиная с 2020 года и в последующий период, поскольку эти соединения способствуют подкислению, эвтрофикации, повышению концентраций приземного озона и твердых частиц. Этот подход, учитывающий многообразие загрязнителей и видов их воздействия, стимулирует дальнейшую работу по изучению многочисленных воздействий загрязнения воздуха и взаимодействий азота. После учреждения в 2007 году Целевой группы по химически активному азоту (ЦГХАА) (ECE/EB.AIR/91/Add.1, решение 2007/1) этот подход был расширен в рамках *Европейской оценки азота: источники, воздействие и перспективы политики* (European Nitrogen Assessment: Sources, effects and policy perspectives, (Sutton and others, 2011)) в целях рассмотрения всего спектра взаимодействий азотных соединений, связывающих воздух, воду, климат, экосистемы и почву, включая определение вариантов борьбы с загрязнением.

6. Что касается сельскохозяйственных источников загрязнения воздуха, то основное внимание в рамках Гётеборгского протокола было направлено на выбросы NH<sub>3</sub>, который в регионе ЕЭК ООН главным образом выделяется из экскрементов животных и азотсодержащих удобрений. Это привело к разработке *Руководящего документа о предотвращении и сокращении выбросов аммиака из сельскохозяйственных источников* (Руководство по аммиаку) в качестве всеобъемлющего справочного руководства, измененного в 2012 году (ECE/EB.AIR/120) (опубликовано в виде статьи Bittman and others, 2014). Этот документ дополняется *Рамочным кодексом ЕЭК ООН для надлежащей сельскохозяйственной практики, способствующей сокращению выбросов аммиака* (ECE/EB.AIR/129) — более кратким документом с описанием добровольных подходов, который также может стать отправной точкой для разработки, публикации и распространения Сторонами своих собственных национальных кодексов аммиака, как того требует приложение IX к Гётеборгскому протоколу.

7. В контексте улучшения понимания, вытекающего из Европейской оценки азота (Sutton and others, 2011), в рамках Конвенции о загрязнении воздуха было принято решение о необходимости подготовки руководства по снижению выбросов всех форм азота с акцентом прежде всего на сельскохозяйственные источники, актуальные для всего региона ЕЭК ООН. Эта работа была признана необходимой для содействия достижению целей Гётеборгского протокола (двадцать второй пункт преамбулы); статья 4 (1); статья 6 (1) g); приложение IX, пункт 2) и пересмотренный Гётеборгский протокол (десятый пункт преамбулы); статья 7 (3) d); статья 10 (4). В рамках плана работы по осуществлению Конвенции на 2016–2017 годы, согласованного Исполнительным органом на его тридцать четвертой сессии (Женева, 18 декабря 2015 года), Целевая группа по химически активному азоту взяла на себя обязательство «начать разработку руководящего документа ЕЭК с описанием комплексного подхода к управлению азотом в сельском хозяйстве, охватывающего многочисленные соединения и их синергизм, и показом обеспечиваемых им сопутствующих выгод» (ECE/EB.AIR/133/Add.1, пункт 2.3.4).

8. Помощь в разработке руководящего документа оказали Генеральный директорат по окружающей среде Европейской комиссии и Международная система управления азотом (МСУА). МСУА оказывает научную поддержку на глобальном и региональном уровне в разработке международной политики, практики и повышении осведомленности в области азота при финансовой поддержке через Программу Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) и Глобальный экологический фонд (ГЭФ), и одновременно с этим налаживает партнерские связи, в том числе в рамках Международной инициативы по азоту и Глобального партнерства по регулированию концентрации питательных веществ.

9. Настоящий руководящий документ одновременно является вкладом в развитие деятельности Межконвенционного координационного механизма по азоту (МККМА), работа по созданию которого ведется в настоящее время по линии Рабочей группы по азоту под эгидой Комитета постоянных представителей ЮНЕП. Эта работа формирует ядро «Дорожной карты для действий по устойчивому управлению азотом на 2020–2022 годы (UNEP, 2019a и 2019b) в рамках осуществления резолюции 4/14 Ассамблеи Организации Объединенных Наций по окружающей среде об устойчивом управлении азотом (см. UNEP/EA.4/Res.14).

10. Финансовая поддержка со стороны ЮНЕП/ГЭФ и Европейской комиссии, а также по линии Южноазиатского центра по азоту Фонда исследования глобальных вызовов — региональный вклад в МСУА — позволила обеспечить развитие этой деятельности в рамках двух специальных рабочих совещаний (Брюссель, 11–12 октября 2016 года и 30 сентября — 1 октября 2019 года), включая вклады стран Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии.

11. Важность этой работы подчеркивается в пересмотренном мандате ЦГХАА (ECE/EB.AIR/142/Add.2, решение 2018/6, приложение, пункт 3 g) и h)), включая ее функции:

3 g) изучение взаимосвязи между сокращением выбросов аммиака и других азотных соединений в контексте полезных качеств азота для производства продовольствия и энергии с учетом возможностей обмена опытом по совершенствованию инструментов управления азотом и подходов для реализации наиболее перспективных решений;

3 h) начало деятельности по возможным стратегиям сокращения выбросов, которые позволяют одновременно снижать выбросы аммиака и окислов азота из почвы с учетом растущей доли выбросов  $\text{NO}_x$  в сельском хозяйстве и возможной взаимосвязи между сокращением выбросов оксидов азота и молекулярным азотом.

12. Настоящий руководящий документ является результатом этого процесса. Предполагается, что этот документ поможет активизировать усилия по борьбе с загрязнением воздуха из сельскохозяйственных источников в контексте всего азотного цикла. В частности, руководящий документ имеет целью стимулировать изменения путем четкого выделения многочисленных сопутствующих выгод от сокращения выбросов азота для качества воздуха, изменения климата, качества воды, здоровья человека, экосистем и экономики. С учетом поставленной цели получения многочисленных сопутствующих выгод, вытекающих из более эффективного управления азотом, следует ожидать более слаженных и действенных мер реагирования, которые позволят добиться максимального синергетического эффекта, свести к минимуму компромиссы и ускорить прогресс на пути достижения Целей Организации Объединенных Наций в области устойчивого развития.

## **В. Цели руководящего документа**

### **1. Сфера охвата и целевые группы**

13. В настоящем руководящем документе по комплексному устойчивому управлению азотом основное внимание уделяется сельскохозяйственному сектору, включая системы земледелия и животноводства. Несмотря на то, что на протяжении

многих тысячелетий люди косвенно участвовали в управлении азотом, оно не всегда было устойчивым или комплексным. Использование слова «устойчивый» в названии документа подчеркивает важность учета всего комплекса экологических, социальных и экономических последствий использования азота в сельском хозяйстве. Это согласуется с принятой в марте 2019 года резолюцией 4/14 Ассамблеи Организации Объединенных Наций по окружающей среде об устойчивом регулировании азота и с принятой в Коломбо последующей Декларацией об устойчивом регулировании азота (UNEP, 2019с), а также отражает тот факт, что устойчивое управление азотом выступает необходимым условием для достижения большинства целей в области устойчивого развития.

14. В названии настоящего руководящего документа также фигурирует слово «комплексный». Оно отражает признание экспертами и заинтересованными сторонами необходимости принятия комплексного подхода для увязки вопросов воздуха, воды, климата, стратосферного озона и других проблем в качестве основы для разработки рациональных стратегий. Таким образом, «комплексный» здесь означает возможность и требование понимания синергизма и компромиссов в целях достижения более эффективных результатов. Этот подход также полностью согласуется с текущей деятельностью, координируемой через ЮНЕП и МСУА и направленной на создание Межконвенционного координационного механизма по азоту (МККМА) (Sutton and others, 2019). Эта деятельность направлена на поощрение синергизма посредством сотрудничества между Конвенцией о трансграничном загрязнении воздуха и другими межправительственными конвенциями и программами, ускоряя тем самым продвижение в решении проблем, связанных с азотом, в рамках осуществления резолюции 4/14 Ассамблеи Организации Объединенных Наций по окружающей среде.

15. Настоящий документ, подготовленный под руководством Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха, можно также рассматривать как вклад в более широкую координацию деятельности МККМА, что будет содействовать работе в рамках многих других многосторонних природоохранных соглашений. Настоящий руководящий документ предназначен для разработчиков политики, регулирующих органов и консультантов по вопросам сельского хозяйства, которым будет полезен представленный обзор принципов и методов при разработке комплексных стратегий и политики устойчивого управления азотом. Предполагается, что в будущем могут быть подготовлены материалы, более конкретно ориентированные на потребности различных групп фермеров в регионе ЕЭК ООН и во всем мире.

## **2. Категории Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций и степень эффективности**

### **а) Категории Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций**

16. В настоящем руководящем документе принят подход ЕЭК ООН, разработанный для Руководящего документа по аммиаку (ECE/EB.AIR/120, пункт 18), в соответствии с которым каждый метод сокращения выбросов/смягчения последствий азота относится к одной из трех следующих категорий в соответствии с экспертным заключением<sup>1</sup>:

а) методы и стратегии категории 1: хорошо изучены, считаются осуществимыми или потенциально осуществимыми на практике, и их соответствующая эффективность подтверждена количественными показателями, по меньшей мере, на экспериментальном уровне;

б) методы и стратегии категории 2: являются перспективными, но на данный момент еще недостаточно исследованы, при этом их эффективность во всех случаях с трудом поддается количественной оценке. Это не означает, что они не могут

<sup>1</sup> Категории ЕЭК ООН и система представления степени воздействия, описанные в п. 16 главы I настоящего документа, применяются ко всем разделам настоящего документа.

применяться в рамках какой-либо стратегии сокращения  $\text{NH}_3$  в зависимости от местных условий;

с) методы и стратегии категории 3: пока не имеется данных, подтверждающих их эффективность, или их, по всей видимости, следует исключить по практическим соображениям.

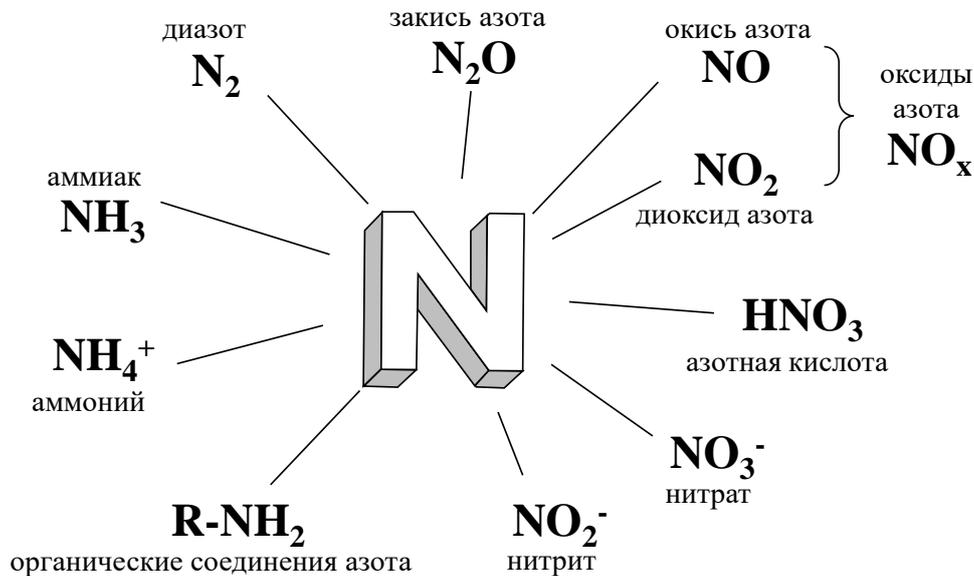
17. В соответствии с этим подходом ЕЭК ООН при выделении указанных категорий не делается никакой привязки к рентабельности или иным экономическим параметрам, и указанные категории основаны исключительно на технических критериях. Поэтому вполне возможна ситуация, когда тот или иной метод может быть отнесен в категории 1, однако при этом не будет рассматриваться как экономически рентабельный с секторальной точки зрения в отсутствие соответствующей поддержки. Этот подход отличен и комплементарен по отношению к определениям наилучших имеющихся методов (НИМ), которые, как правило, включают критерии отсутствия чрезмерных затрат. Таким образом, экспертам гораздо проще отнести метод к той или иной категории ЕЭК ООН (затраты на реализацию мер оговариваются отдельно, при наличии таких данных) в сравнении с обсуждениями технических и политических аспектов, которые необходимы для согласования соответствующих стандартов для НИМ. В приведенном ниже техническом обзоре каждая мера отнесена к одной из категорий ЕЭК ООН для каждой формы азота в соответствии со следующим цветовым кодом: зеленый (категория 1); желтый (категория 2); и красный (категория 3). Следует подчеркнуть, что красный цветовой код для категории 3 не означает, что метод оказывает какое-либо неблагоприятное воздействие, а просто указывает на то, что эффективность данного метода еще не подтверждена. Это может означать необходимость дальнейших исследований и разработок.

18. Подход ЕЭК ООН здесь расширен, с тем чтобы каждый метод мог быть отнесен к категории в соответствии с его применимостью к каждой основной форме азота:  $\text{NH}_3$ ;  $\text{NO}_x^2$ ; закись азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ); нитрат ( $\text{NO}_3^-$ ), включая другие потери азотных соединений из водных растворов; молекулярный диазот ( $\text{N}_2$ ); и общую потерю азота. В документе также используется термин «химически активный азот» ( $\text{N}_r$ ), который относится ко всем азотным соединениям за исключением  $\text{N}_2$ , который является инертным (см. рис. I.1 ниже).

---

<sup>2</sup> Оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ) представляют собой смесь окиси азота ( $\text{NO}$ ) и диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ). Выбросы  $\text{NO}_x$  из сельскохозяйственных почв происходят в основном в виде  $\text{NO}$ , хотя также возможны выбросы в виде  $\text{NO}_2$ . Реакции  $\text{NO}$  с озоном ( $\text{O}_3$ ) в воздушном пространстве ярусов листового полога могут означать, что значительная часть выбросов происходит в виде  $\text{NO}_2$  на уровне ярусов. Поскольку ранее научное сообщество в основном оперировало выбросами  $\text{NO}$  из почв, по этим причинам и в интересах обеспечения соответствия с номенклатурой Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха), в данном документе в первую очередь речь идет о выбросах  $\text{NO}_x$  из почв.

Рис. I.1  
Основные формы азота, встречающиеся в окружающей среде



Источник: данный рисунок подготовлен для настоящего документа.

Примечание: все формы азота, за исключением  $N_2$ , часто объединяются названием связанный азот или активный азот ( $N_f$ ).

#### б) Степень воздействия

19. Настоящий руководящий документ не заменяет собой Руководящий документ ЕЭК ООН по аммиаку (ECE/EB.AIR.120), который содержит гораздо более подробную информацию о количественных оценках эффективности методов борьбы с загрязнением  $NH_3$  и расходах, связанных с различными методами контроля  $NH_3$ . В отличие от Руководящего документа по аммиаку в настоящем документе невозможно представить количественные параметры по всем азотным соединениям, перечисленным во всех мерах. Чтобы решить эту проблему, в настоящем документе для каждой меры приводится качественная оценка, характеризующая ее эффективность с точки зрения сокращения потерь каждой формы азота. Используется следующая система обозначений:

- а) стрелки, направленные вниз, указывают на уменьшение потерь:  
 $\downarrow$  — низкая — средняя эффективность;  $\downarrow\downarrow$  — средняя — высокая эффективность;
- б) стрелки, направленные вверх, указывают на увеличение потерь:  
 $\uparrow$  — низкая — средняя эффективность;  $\uparrow\uparrow$  — средняя — высокая эффективность;
- в)  $\sim$  означает незначительную эффективность или ее отсутствие;
- г)  $?$  указывает на неопределенность.

20. Степень воздействия той или иной меры может рассматриваться как показатель ее «эффективности», но не степени «применимости» в различных контекстах. Стрелки указывают на результаты применения описанной меры (например, системы содержания животных, внесение удобрений), однако при этом необходимо также учитывать и более широкие системные последствия. Если делается вывод о том, что конкретная мера приводит к увеличению потерь азота в той или иной форме, то она по определению также относится к категории 3 для данной формы азота. Если необходимо разъяснение, степень воздействия той или иной меры описывается в сравнении с конкретной типовой системой.

21. Некоторые меры, направленные на снижение загрязнения одной формой азота, могут увеличить риск потерь азота в других формах. Такие компромиссы (или «замена

загрязняющих веществ») не являются неизбежными — зачастую их можно устранить путем принятия соответствующих мер, которые трудно свести в таблицу. Поэтому в описании каждой меры, как правило, упоминаются основные взаимодействия, при этом глава III посвящена принципам надлежащего управления азотом, позволяющим свести к минимуму компромиссы и максимизировать синергетический эффект. Это подчеркивает возможность разработки согласованных «пакетов мер». Например, хотя многие из мер применимы как в обычных, так и органических системах (а также в других агроэкологических системах земледелия), общие пакеты мер будут различаться в зависимости от климата и системы земледелия.

Рис. I.2

**Упрощенное сравнение линейной экономики и экономики замкнутого цикла для азота в агропродовольственной системе**



Источник: данный рисунок подготовлен для настоящего документа.

22. Для некоторых соединений азота потери, как правило, намного больше, чем для других с точки зрения общей массы потерь. Наибольшие потери зачастую происходят в виде выбросов  $NH_3$ , выщелачивания/смыва нитратов и других азотных соединений, а также восстановления в процессе денитрификации до молекулярного азота. Напротив, выбросы закиси азота ( $N_2O$ ) и  $NO_x$ , как правило, составляют небольшую часть потоков азота (часто  $\sim 1\%$  входных потоков). Хотя потери  $N_2O$  и  $NO_x$  в сельскохозяйственных системах, таким образом, вносят лишь незначительный вклад в общую потерю азота, они актуальны в силу их специфического воздействия на качество воздуха, климат и истощение озонового слоя в стратосфере. И наоборот, хотя выбросы диазота ( $N_2$ ) в результате денитрификации являются экологически безопасными, они представляют собой потенциально значительную часть доступных азотных ресурсов. Это означает, что сокращение выбросов  $N_2$  важно, потому что оно позволяет улучшить общую эффективность системы, снижая потребность в производстве новых азотных соединений и, тем самым помогая уменьшить потери азота и ослабить воздействие по всем каналам. Стратегическая цель настоящего руководящего документа заключается в том, чтобы содействовать переходу к «экономике замкнутого цикла» в отношении азота, как это показано на рис. I.2 выше.

**С. Основные тезисы руководящего документа**

23. Стержнем настоящего руководящего документа является комплекс принципов устойчивого управления азотом, которые сопровождаются подробным рассмотрением мер по сокращению потерь азота из основных компонентов агропродовольственной системы.

24. Описание устойчивого управления азотом опирается на десять ключевых положений, связанных с круговоротом азота, которые показаны на рисунке I.3 ниже.

Чтобы перейти в управлении человеком азотным циклом от системы, делающей акцент на новом производстве азотных соединений, и расточительных потерь, к более циклической системе, обеспечивающей максимальное извлечение и повторное использование имеющихся азотных ресурсов, необходимо признать фундаментальные факторы, связанные с биогеохимическими процессами.

25. В техническом обзоре определены и обобщены 24 принципа комплексного устойчивого управления азотом. Первый из перечисленных принципов воплощает в себе общую концепцию принятого подхода:

Принцип 1. Цель комплексного устойчивого управления азотом в сельском хозяйстве заключается в уменьшении потерь азота, попадающих в окружающую среду, в интересах защиты здоровья человека, климата и экосистем при одновременном обеспечении достаточного производства продовольствия и эффективности использования азота, в том числе посредством надлежащего регулирования вводимого азота.

26. Все эти принципы играют важную роль, при этом широкое разнообразие принципов отражает многообразие форм, проблем и воздействий, связанных с N. Учет этих принципов позволяет создать прочную основу для оптимального выбора мер.

27. В основе управления азотом лежит постулат о том, что учет всего азотного цикла позволяет выявить синергизм и свести к минимуму компромиссы. Эту мысль можно проиллюстрировать сравнением принципов 4, 5 и 6 устойчивого управления азотом:

a) Принцип 4. Возможные компромиссы в отношении последствий мер по сокращению/смягчению последствий потерь азота могут потребовать определения приоритетов, например, в отношении того, какие неблагоприятные воздействия должны быть рассмотрены в первую очередь;

b) Принцип 5: Меры контроля поступления азота влияют на все механизмы потери азота;

c) Принцип 6: Мера по сокращению одной формы загрязнения позволяет сохранить в сельскохозяйственной системе больше азота, доступного для удовлетворения потребностей выращиваемых растений и животных.

Рис. I.3

**Десять ключевых положений, связанных с круговоротом азота**



Источник: данный рисунок подготовлен для настоящего документа.

*Примечание:* эти ключевые положения лежат в основе принципов комплексного устойчивого управления азотом. Цифры отражают порядок очередности, описанный в главе III настоящего документа. Люди вводят в азотный цикл огромное количество дополнительного активного азота, в результате чего система сейчас не находится в равновесии.

28. Принцип 7 гласит, что «баланс «вход — выход» по азоту воплощает в себе принцип — количество на входе должно быть равно количеству на выходе». Это означает необходимость обеспечения того, чтобы вводимые количества соответствовали потребностям сельскохозяйственных растений и домашнего скота, что позволит одновременно с этим сократить все потери азота (принцип 8), а также необходимость учета пространственной вариации уязвимости сельскохозяйственных и полустепных земель (принципы 9 и 10). Важность землепользования и управления ландшафтом отражена в принципе, признающем, что неудобранные сельскохозяйственные земли и лесные массивы способны стать буферами, которые могут повысить устойчивость ландшафта, чтобы снизить негативные последствия для местной окружающей среды (принцип 11) при условии, что это не противоречит каким-либо конкретным целям сохранения местообитаний для самих выявленных буферных экосистем.

29. Широко признается, что управление азотом следует рассматривать в увязке с другими ограничивающими факторами, которые необходимо оптимизировать для максимально возможного сокращения загрязнения азотом как для систем растениеводства, так и животноводства (принципы 12 и 13). Эта мысль развивается в принципах, признающих необходимость рассмотрения управления азотом в контексте более широкого управления циклами всех питательных веществ и биогеохимическими процессами (включая углерод (C), фосфор (P), серу (S), кремний (Si), питательные микроэлементы и т. д.) и водными ресурсами (принципы 19, 20 и 21).

«После разбрасывания навоз нужно сразу же запахать и покрыть землей, чтобы он не потерял свою силу от солнечного тепла...»

*Колумелла, около 50 года н. э.*

30. Принципы 14, 15, 16 и 17 отражают физико-химическую основу сокращения выбросов, включая замедление гидролиза мочевины, сведение к минимуму контакта богатых аммиаком ресурсов с воздухом и нагрева солнечным теплом, а также замедление процессов нитрификации и денитрификации, что одновременно максимально повышает потенциал полезного управления азотными ресурсами.

31. Общеизвестно, что управление азотом в сельском хозяйстве тесно связано со всей продовольственной системой. Из этого следует, что для достижения амбициозных целей в области устойчивого развития большое значение будут иметь как системы кормления домашних животных и пищевой рацион людей, а также утилизация отходов (принцип 18). В то же время в стратегиях кормления жвачных животных необходимо учитывать возможное воздействие на выбросы метана (принцип 22), при этом определенные меры могут быть противопоказаны для устойчивого управления азотом и метаном.

32. В других принципах подчеркивается важность социально-экономического контекста, включая местные аспекты, для различных субъектов в сельском хозяйстве и продовольственной цепочке, где эти субъекты несут совместную ответственность за управление азотом (принцип 2), включая снабжение продовольствием, переработку пищевых продуктов, розничную торговлю и потребителей. В рамках этих принципов подчеркивается, что «уровень фермерского хозяйства зачастую является основной точкой интеграции решений по предупреждению/снижению выбросов» (принцип 24) в дополнение к более широким действиям граждан и других акторов в продовольственной системе. В случае фермеров принцип 23 признает, что при определении стоимости и эффективности мер по сокращению потерь азота необходимо учитывать региональные возможности и ограничения фермеров, в том числе влияние размера хозяйств, их структуры и экономического контекста. В целом эти принципы показывают, что комплексное устойчивое управление азотом дает

возможность различным субъектам агропродовольственной системы работать сообща, при этом эффективность, сокращение отходов, забота об окружающей среде и инвестиции в прибыльное производство продуктов питания тесно взаимосвязаны.

33. В техническом обзоре и главах IV–VI приводится подробный перечень выявленных мер с указанием возможностей для предупреждения и снижения выбросов различных форм азота, критичных в контексте загрязнения воздуха, воды, изменения климата, биоразнообразия, здоровья человека, стратосферного озона и т. д. В заключительной главе VII дается краткий анализ возможностей сочетания различных мер и приводятся примеры возможных «пакетов мер», которые могут обеспечить согласованный подход к устойчивому регулированию азота в соответствии с уровнями амбициозности, необходимыми для достижения различных местных, национальных и международных целей.

34. В настоящем документе сделан значительный шаг вперед в деле поддержки разработки международной политики за счет применения знаний об азотном цикле в целях стимулирования устойчивого развития в контексте многочисленных вызовов. Следуя этому подходу, документ открывает новые возможности, предоставляя рекомендации по снижению потерь всех основных форм азота:  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{N}_2$ . Хотя такая интеграция разных аспектов — это новшество, опирающееся на последние исследования, она также исходит из многолетнего опыта. Мысль об этом была высказана римским фермером, писавшим почти 2000 лет назад:

«После разбрасывания навоз нужно сразу же запахать и покрыть землей, чтобы он не потерял свою силу от воздействия солнечного тепла, и чтобы при смешивании с ним почва стала тучной благодаря внесенной подкормке. И поэтому, когда кучи навоза вывозятся и распределяются на поле, их количество должно быть таким, чтобы пахари смогли закопать навоз в землю в тот же день».

Колумелла, *О сельском хозяйстве* 2.5.2  
(перевод Бойда Эша, 1941 год).

35. Эта мера и лежащие в ее основе принципы, как пояснил Колумелла, остаются актуальными и по сей день и представлены в настоящем руководящем документе. Этот пример показывает, что важность мер по сокращению потерь питательных веществ признается веками. Задача состоит в том, чтобы применять их на практике.

## D. Справочная литература

- Bittman, S. and others, eds. (2014). *Options for ammonia mitigation: guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen*. Edinburgh: Centre for Ecology and Hydrology. Available at [www.clrtap-tfm.org/sites/clrtap-tfm.org/files/documents/AGD\\_final\\_file.pdf](http://www.clrtap-tfm.org/sites/clrtap-tfm.org/files/documents/AGD_final_file.pdf).
- Boyd Ash, H., transl. (1941). *Columella. On Agriculture, Volume I: Books 1–4*. Loeb Classical Library 361, Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Erisman, J.W. and others (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, vol. 1, No. 10 (October), pp. 636–639.
- Kanter, D.R. and others (2020). Nitrogen pollution policy beyond the farm. *Nature Food*, vol. 1 (January), pp. 27–32.
- Lassaletta, L. and others (2014). Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends. *Biogeochemistry*, vol. 118, No. 1–3 (April), pp. 225–241.
- Leip, A. and others (2015). Impacts of European livestock production: nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. *Environmental Research Letters*, vol. 10, No. 11 (November).
- Oenema, O. and others (2011a). Nitrogen in current European policies, in *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives*, Sutton, M.A. and others, eds. (Cambridge, Cambridge University Press).
- Oenema, O. and others (2011b). Developing integrated approaches to nitrogen management, in *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives*, Sutton, M.A. and others, eds. (Cambridge, Cambridge University Press).
- Springmann, M. and others (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, vol. 562, No. 7728 (October), pp. 519–525.
- Sutton, M.A. and others, eds. (2011). *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives* (Cambridge, Cambridge University Press).
- Sutton, M.A. and others (2013). *Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution*. Global Overview of Nutrient Management (Edinburgh, Centre of Ecology and Hydrology).
- Sutton, M.A. and others (2019). The Nitrogen Fix: From nitrogen cycle pollution to nitrogen circular economy, in *Frontiers 2018/19: Emerging Issues of Environmental Concern* (Nairobi, United Nations Environment Programme (UNEP)), pp. 52–65.
- Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН) 1999 год. *Протокол о борьбе с подкислением, эвтрофикацией и приземным озоном (Гётеборгский протокол, пересмотренный вариант 2012 год)*.
- ЕЭК ООН (2015 год). *Рамочный кодекс ЕЭК ООН для надлежащей сельскохозяйственной практики, способствующей сокращению выбросов аммиака*. Available at [www.unece.org/environmental-policy/conventions/envlrtapwelcome/publications.html](http://www.unece.org/environmental-policy/conventions/envlrtapwelcome/publications.html).
- UNEP (2019a). *Road map for action on Sustainable Nitrogen Management 2020–2022*. Available at [https://papersmart.unon.org/resolution/uploads/roadmap\\_for\\_action\\_on\\_sustainable\\_nitrogen\\_management\\_roadmap1.1.pdf](https://papersmart.unon.org/resolution/uploads/roadmap_for_action_on_sustainable_nitrogen_management_roadmap1.1.pdf).
- UNEP 2019b. *Concept note to the Road map for action on Sustainable Nitrogen Management 2020–2022*. Available at [https://papersmart.unon.org/resolution/uploads/roadmap\\_for\\_action\\_on\\_sustainable\\_nitrogen\\_management\\_concept\\_note1.1\\_draft.pdf](https://papersmart.unon.org/resolution/uploads/roadmap_for_action_on_sustainable_nitrogen_management_concept_note1.1_draft.pdf).
- UNEP 2019c. *Colombo Declaration on Sustainable Nitrogen Management*. Launch of United Nations Global Campaign on Sustainable Nitrogen Management, 23 and 24 October 2019, *Colombo*. Available at <https://papersmart.unon.org/resolution/sustainable-nitrogen-management>.

Westhoek, H. and others (2014). Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe's meat and dairy intake. *Global Environmental Change*, vol. 26 (May), pp. 196–205.

Westhoek, H. and others (2015). *Nitrogen on the Table: The influence of food choices on nitrogen emissions and the European environment*. European Nitrogen Assessment Special Report on Nitrogen and Food (Edinburgh, Centre for Ecology and Hydrology).

Zhang, X. and others (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, vol. 528, No. 7580 (November), pp. 51–59.

## II. Технический обзор

### Интеграция принципов и мер для устойчивого управления азотом в агропродовольственной системе

36. Представленные в настоящем документе руководящие указания можно разделить на четыре основные темы:

a) **Принципы комплексного устойчивого управления азотом.** В главе III приводится исходная базовая информация, помогающая понять комплексный подход, включая ключевые этапы круговорота азота, аспекты интеграции и принципы, лежащие в основе мер;

b) **Стойловое содержание животных, хранение и переработка навоза.** В главе IV обосновывается необходимость применения комплексного подхода к управлению навозом — с момента его образования до хранения, включая возможные технологии переработки, в которых навоз рассматривается в качестве ценного азотного и питательного ресурса, подлежащего рециркуляции. Основная часть главы состоит в кратком описании ключевых мер по регулированию режима кормления, содержания животных, управлению навозом и рекуперации питательных веществ;

c) **Применение органических и неорганических удобрений.** В главе V рассматриваются вопросы внесения навоза в свете возможностей по улучшению применения синтетических неорганических удобрений. Согласно установленным нормам, «неорганические удобрения» включает в себя удобрения на основе синтетической мочевины. Главное в этой главе — краткое описание ключевых мер, связанных с внесением удобрений;

d) **Землепользование и управление ландшафтом.** В главе VI разъясняется, каким образом решения в области землепользования и управления ландшафтом обеспечивают возможности для комплексного управления азотом. Хотя основное внимание уделяется смягчению неблагоприятных последствий, меры в этой области могут также способствовать сокращению выбросов азота. Главная часть главы — это краткое описание наиболее важных мер.

37. Настоящий технический обзор включает в себя информацию об эффективности каждой меры для каждой формы азота (см. рис. II.1 ниже) в соответствии с категориями ЕЭК ООН<sup>3</sup>:

---

<sup>3</sup> Описание категорий ЕЭК ООН и подхода к представлению степени воздействия см. в п. 16 главы I настоящего документа.

Рис. II.1

**Иллюстрация эффективности каждой из мер для каждой формы N в соответствии с категориями ЕЭК ООН, определенными в настоящем документе**



**Рис. II.1:** Иллюстрация эффективности каждой из мер для каждой формы N в соответствии с категориями ЕЭК ООН, определенными в настоящем документе

- Категория 1:** ● (зеленый)
- Категория 2:** ● (желтый)
- Категория 3:** ● (красный)

38. Более подробная информация об эффективности каждой меры, включая качественную оценку степени воздействия, содержится в главах IV, V и VI. Снижение величины «Общих потерь N» указывает на возможность косвенного снижения всех остальных потерь азота.

## **А. Принципы комплексного устойчивого управления азотом**

39. Азот (N) приносит существенную пользу обществу, повышая урожайность, обогащая рацион питания человека, в том числе за счет увеличения производства и потребления мясных и молочных продуктов. Однако потери азота создают целый комплекс проблем, затрагивающих воздух, воду, здоровье человека, климат, биоразнообразие и экономику. Для понимания принципов устойчивого управления азотом для начала необходимо рассмотреть ключевые положения, касающиеся круговорота азота (см. вставку II.1 ниже).

### **Вставка II.1**

**Десять ключевых положений, касающихся круговорота азота, которые важны для комплексного устойчивого управления азотом**

- 1. Азот необходим для жизни.** Азот является элементом, входящим в состав хлорофилла растений, аминокислот (белков), нуклеиновых кислот и аденозинтрифосфата всех живых организмов, в том числе бактерий растений, животных и человека. Азот часто является фактором, ограничивающим рост растений.
- 2. Избыток азота сопряжен с целым рядом негативных последствий, особенно для здоровья человека, экосистемных услуг, биоразнообразия через воздух, воду и изменение климата.** За последнее столетие общее количество азота, поступающего в глобальную биосферу в результате человеческой деятельности, значительно возросло (более чем вдвое), и в настоящее время превысило критический порог так называемого «безопасного оперативного пространства» для человечества.

**3. Азот существует в нескольких формах.** Большинство форм азота являются «химически активными» ( $N_f$ ), потому что они легко переходят из одной формы в другую благодаря биохимическим процессам, в которых участвуют микроорганизмы, растения и животные, а также химическим процессам, на которые влияет климат. Диазот ( $N_2$ ) является инертным газом, из которого в основном (на 78 %) состоит атмосферный воздух. Азот является «вдвойне мобильным», потому что он легко транспортируется в окружающей среде как в воздухе, так в воде.

**4. Один и тот же атом азота может приводить к различным последствиям для атмосферы, наземных экосистем, пресноводных и морских систем, а также для здоровья человека.** Это явление получило название «N-каскада», который определяется как последовательный перенос  $N_f$  через системы окружающей среды.

**5. Азот переходит из почвы в растения и животных, в воздух и водные объекты и обратно с международным трансграничным переносом загрязнителей большинства форм азота.** Эти потоки являются результатом природных факторов и человеческой деятельности, которые необходимо понимать для эффективного управления азотом.

**6. Деятельность человека сильно изменила естественный круговорот азота и привела к тому, что объем потерь в нем возрос.** К основным причинам относятся: создание синтетических неорганических азотных удобрений; изменения в землепользовании; урбанизация; процессы сжигания; и транспортировка продовольствия и кормов по всему миру. Это приводит к азотному истощению в районах-экспортерах продовольственных сельскохозяйственных культур/кормов и региональному азотному обогащению в городах и районах с интенсивным животноводством. Региональная сегментация производства и потребления продуктов питания и кормов также является одним из основных факторов снижения эффективности использования азота в масштабах всей продовольственной системы в мире за последние десятилетия.

**7. Характер и антропогенные изменения круговорота азота ставят под угрозу как переход к экономике замкнутого цикла, так и комплексное устойчивое управление азотом.** Устойчивое управление азотом создает основу для становления формирующейся «экономики замкнутого цикла по азоту», сокращая потери азота и способствуя его восстановлению и повторному использованию.

**8. Чтобы быть эффективными для роста растений соединения азота должны находиться вблизи корней растений.** Способность усваивать азот зависит от потребности растения в азоте, длины и плотности корней, а также наличия  $NO_3^-$  и  $NH_4^+$  в почвенном растворе.

**9. Некоторые виды растений способны преобразовывать инертный  $N_2$  в химически активные формы ( $NH_3$ , амин, белок) с помощью особых бактерий, живущих в корневых узелках растений.** Этот процесс биологической фиксации азота является важным источником химически активного азота в биосфере, в том числе в сельском хозяйстве, и может также стать источником загрязнения азотом.

**10. Человеку и животным для роста, развития и жизнедеятельности требуется небольшое количество N-белка и аминокислот, однако лишь небольшая доля вводимого азота сохраняется в массе тела и/или молоке и яйцах.** Остальная часть выводится из организма, в основном с мочой и фекалиями, и этот азот может рециркулироваться и использоваться повторно.

40. Комплексное устойчивое управление азотом в сельском хозяйстве преследует двоякую цель: сократить выбросы/потери азота, в том числе в интересах охраны здоровья человека, окружающей среды и климата; и оптимизировать положительный эффект азота, связанный с производством продуктов питания, за счет сбалансированного использования удобрений и принципов экономики замкнутого цикла.

41. Многие стратегии в области охраны окружающей среды зачастую не предусматривают каких-либо мер в области управления азотом и поэтому могли бы выиграть от применения комплексного подхода. К примеру, большинство источников  $\text{NO}_x$  и  $\text{NH}_3$  были включены в Гётеборгский протокол, однако выбросы  $\text{NO}_x$  из сельскохозяйственных почв, (полу)естественных источников  $\text{NO}_x$  и  $\text{NH}_3$  при оценке соблюдения обязательств по сокращению выбросов в соответствии с Гётеборгским протоколом не учитываются, равно как и выбросы  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$  в атмосферу и попадание азота в водоемы в результате выщелачивания. И наоборот, в Директиве Европейского союза по нитратам<sup>4</sup> предусматривается, что необходимо учитывать все источники азота в сельском хозяйстве на предмет сокращения объемов выщелачивания  $\text{NO}_3^-$ , однако при этом атмосферные выбросы  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$  напрямую не рассматриваются.

## 1. Различные аспекты интеграции в управление азотом

42. **Аспект 1.** Основой текущей политики в отношении азота являются **причина и воздействие**, поскольку воздействие на здоровье человека и окружающую среду, вызванное выбросами азота, служит стимулом для принятия мер политики по сокращению этих выбросов.

43. **Аспект 2.** **Пространственная и временная интеграция** всех форм и источников азота, влияющих на определенные области и временной масштаб в планах управления, играет важную роль для обеспечения возможности извлечения всего комплекса сопутствующих выгод от действий, позволяя высвободить весь синергизм при минимизации негативных компромиссов в подходах к управлению азотом.

44. **Аспект 3.** Азот входит в состав **многочисленных питательных веществ и загрязнителей**. Как элемент N уникален по многообразию влияния его соединений на окружающую среду и устойчивость. Поэтому устойчивое управление азотом диктует необходимость интеграции с другими элементами и соединениями:

- a) между  $\text{NH}_3$  и  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , ЛОС и РМ в области загрязнения воздуха;
- b) между азотом и углеродом, включая  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  при учете воздействия изменения климата;
- c) между азотом, фосфором (P), калием (K) и кремнием (Si) при учете вопросов эвтрофикации пресноводных систем и прибрежных зон;
- d) между азотом и всеми другими основными питательными веществами растительного происхождения (либо макро-, либо микроэлементы) при рассмотрении вопросов питания сельскохозяйственных культур, домашнего скота и человека;
- e) между азотом и водой для орошения при рассмотрении вопроса об устойчивом управлении водными ресурсами.

45. **Аспект 4.** **Учет мнений заинтересованных сторон**, который является еще одним измерением, должен быть реализован как можно раньше на этапе разработки планов и мер по управлению азотом. Широкое участие заинтересованных сторон обеспечивает, что меры политики будут:

- a) актуальны, охватывая основные проблемы;
- b) научно и аналитически обоснованы;
- c) затратоэффективны (в частности, затраты должны быть соразмерны поставленной цели); и
- d) справедливы по отношению ко всем субъектам/пользователям.

46. **Аспект 5.** **Региональная интеграция** направлена на расширение сотрудничества между регионами и странами, включая ландшафтный масштаб.

<sup>4</sup> Директива Совета от 12 декабря 1991 года о защите вод от загрязнения нитратами из сельскохозяйственных источников (91/676/ЕЕС), *Official Journal of the European Communities*, L 375 (1991), сс. 1–8 (текста на английском языке).

В пользу необходимости региональной интеграции говорят, в частности, следующие аргументы:

- a) укрепление рынков;
- b) создание «единых правил» для осуществления политических мер;
- c) трансграничный характер загрязнения окружающей среды;
- d) анализ косвенных последствий загрязнения; и
- e) повышение эффективности и действенности региональной политики и связанных с ней управленческих мер.

47. Гётеборгский протокол продемонстрировал преимущества разработки подхода, объединяющего ряд различных загрязнителей и видов воздействий. Если в случае азота большинство источников  $\text{NO}_x$  и  $\text{NH}_3$  уже включены в расчеты при определении предельных значений выбросов, то для учета выбросов  $\text{NO}_x$  из сельскохозяйственных почв, (полу)естественных источников  $\text{NO}_x$  и  $\text{NH}_3$ , а также взаимосвязи с выбросами  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$  и выщелачиванием  $\text{NO}_3^-$  требуются дальнейшие усилия. Необходимость объединения этих вопросов была недавно признана в резолюции 4/14 Ассамблеи Организации Объединенных Наций по окружающей среде об устойчивом регулировании азота и в последовавшей за ней Декларации Коломбо. В этих документах подчеркиваются беспроектные возможности для окружающей среды, здоровья и экономики, включая качество воздуха, воды, климата, стратосферного озона и защиты биоразнообразия, наряду с обеспечением устойчивыми продуктами питания и энергией.

## 2. Принципы комплексного устойчивого управления азотом

48. Ниже сформулированы 24 принципа комплексного устойчивого управления азотом:

a) **Принцип 1. Цель комплексного устойчивого управления азотом в сельском хозяйстве заключается в снижении потерь азота в окружающую среду в интересах защиты здоровья человека, климата и экосистем при одновременном обеспечении достаточного производства продовольствия и эффективности использования азота, в том числе посредством обеспечения надлежащего баланса входа азота;**

b) **Принцип 2. В сельском хозяйстве и пищевой цепочке участвуют различные субъекты, каждый из которых играет определенную роль в управлении азотом.** Все участники продовольственной цепочки, в том числе директивные органы на нескольких уровнях, несут общую ответственность за усилия по сокращения потерь азота и за совместное покрытие затрат и пользование выгодами, связанными с мерами по сокращению/смягчению последствий потерь азота;

c) **Принцип 3. Для снижения потерь азота в конкретных процессах требуются специальные меры.** Это связано с наличием ряда различных механизмов потерь азота, среди которых: улетучивание  $\text{NH}_3$ , выщелачивание  $\text{NO}_3^-$ , вымывание всех форм  $\text{N}_r$  в поверхностные воды и газообразные выбросы  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ , связанные с процессами нитрификации-денитрификации. Конкретные меры для того или иного механизма зависят от воздействующих в этих процессах факторов;

«Поэтому сокращение поступления азота и повышение продуктивности являются важной частью комплексного управления азотом, при этом должна обеспечиваться возможность повышения экономических показателей».

*Из принципа 6*

d) **Принцип 4. Возможные компромиссы в отношении воздействия мер по сокращению/смягчению потерь азота могут потребовать определения приоритетов, например, в отношении того, какие неблагоприятные воздействия должны быть рассмотрены в первую очередь.** Для обоснования таких приоритетов и надлежащей оценки возможных вариантов с учетом местного контекста и

воздействия на глобальном уровне необходимы руководящие указания по мерам политики;

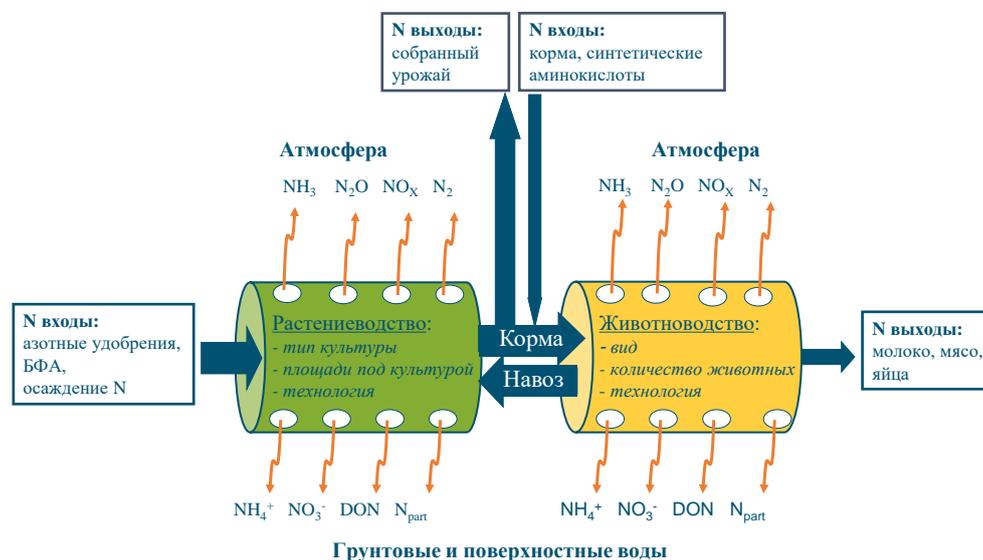
е) **Принцип 5. Меры контроля поступления азота влияют на все механизмы потери азота.** Эти меры привлекательны тем, что сокращение поступления азота (например, за счет предупреждения использования избыточных количеств удобрений, избыточного содержания белка в рационе питания животных и использования продуктов питания для человека с высоким азотным следом) приводит к уменьшению потока азота через всю систему «почва — корма — продовольствие»;

ф) **Принцип 6. Меры по сокращению одной формы загрязнения оставляют в сельскохозяйственной системе больше азота, доступного для удовлетворения потребностей выращиваемых растений и животных.** Чтобы реализовать преимущество той или иной меры по сокращению потерь азота (и избежать «замены загрязняющих веществ»), объем потерь азота, который удалось предотвратить с помощью этой меры, должен быть уравновешен снижением количества вводимого азота, либо увеличением объема хранения, либо увеличением количества азота в собранном продукте. Поэтому сокращение поступления азота и повышение продуктивности являются важной частью системы комплексного управления азотом, при этом должна обеспечиваться возможность повышения экономических показателей;

г) **Принцип 7. Баланс «вход — выход» по азоту воплощает в себе правило — количество на входе должно быть равно количеству на выходе,** а также, что основными механизмами сокращения потерь азота являются управление поступлением азота и максимальное увеличение пулов хранения азота (в навозе, почве и растениях) (см. рис. П.2 ниже);

Рис. П.2

**Концепция массового баланса «вход — выход» по азоту — смешанные системы производства, сочетающие растениеводство и животноводство**



*Источник:* по материалам Oenema and others (2009).

*Примечание:* общее количество вводимого азота должно соответствовать общему количеству на выходе после корректировок на возможные изменения в объеме хранения в системе. Эта концепция применима на уровне отдельного поля, фермерского хозяйства, в региональном и глобальном масштабах для всех типов хозяйств (глава III).

h) **Принцип 8. Обеспечение соответствия количеств вводимого азота потребностям сельскохозяйственных культур (иначе говоря, «сбалансированное использование удобрений») и потребностям сельскохозяйственных животных открывает возможности для одновременного снижения потерь азота во всех**

**формах, что позволяет одновременно улучшить экономические показатели.** Естественные различия между системами растениеводства и животноводства также подразумевают возможности для сочетания животноводства и растениеводства и оптимизации баланса типов продуктов питания;

**i) Принцип 9. Пространственные вариации в уязвимости сельскохозяйственных земель по отношению к потерям азота требуют применения пространственно-эксплицитных мер по управлению азотом на полях и/или в ландшафте.** Этот принцип применим к внесению как органических, так и неорганических удобрений;

**j) Принцип 10. Пространственные вариации в чувствительности естественных местообитаний к азотным нагрузкам, связанным с сельскохозяйственной деятельностью, диктуют необходимость принятия мер по управлению азотом, адаптированных под условия данной местности и региона.** Подход «источник — путь — получатель» в масштабе ландшафта позволяет определить конкретные «горячие точки», конкретные механизмы потери азота, а также конкретные чувствительные или устойчивые зоны;

**к) Принцип 11. Структура элементов ландшафта влияет на способность сохранения и буферизации потоков азота.** Это означает, что экосистемы с высокой способностью удержания азота (например, лесные массивы и неудобряемые сельскохозяйственные земли), как правило, играют роль буфера, который гасит воздействие поступающих в атмосферу азотных соединений, в результате чего меньшее количество азота переносится в другие места. Таким образом, лесные массивы, обширные сельскохозяйственные угодья и другие ландшафтные элементы позволяют абсорбировать и использовать азот, поступающий в процессе атмосферного осаждения, и азот, который в противном случае был бы потерян в результате латерально направленного потока. Этот принцип лежит в основе планирования повышения общей устойчивости ландшафта, где, например, посадка новых лесных массивов (специально с целью фиксации азота) может стать частью пакета мер по содействию защите других местообитаний (включая другие лесные массивы и экосистемы, где природоохранные цели являются согласованным приоритетом);

**l) Принцип 12. Для минимизации загрязнения, связанного с потерями азота, все факторы, определяющие, ограничивающие и тормозящие рост сельскохозяйственных культур, должны рассматриваться одновременно и сбалансированно, чтобы оптимизировать продуктивность растений и эффективность использования азота.** Элементы включают: отбор сортов сельскохозяйственных культур, адаптированных к местным климатическим и экологическим условиям; подготовка подходящей почвы; обеспечение достаточного уровня всех основных питательных элементов и воды; и принятие надлежащих мер по борьбе с сорняками, вредителями и болезнями, а также с загрязнением окружающей среды;

**m) Принцип 13. Для минимизации загрязнения, связанного с потерями азота, все факторы, определяющие, ограничивающие или тормозящие рост и ухудшающие благосостояние животных, должны рассматриваться одновременно и сбалансированно, чтобы оптимизировать производство животноводческой продукции и эффективность использования азота, а также уменьшить экскрецию азота на единицу продукции животноводства.** Элементы включают: отбор пород сельскохозяйственных животных, адаптированных к местным климатическим и экологическим условиям; обеспечение наличия высококачественных кормов и воды; и принятие мер по обеспечению контроля за болезнями, здоровьем, рождаемостью и загрязнением, включая благополучие животных;

**n) Принцип 14. Замедление гидролиза мочевины и ресурсов, содержащих мочевую кислоту, снижает выбросы NH<sub>3</sub>.** Гидролиз этих ресурсов продуцирует NH<sub>3</sub> в растворе и локально увеличивает pH почвы, поэтому замедление гидролиза позволяет предупредить повышение до пиковых значений концентрации

аммония и рН, что также может снизить другие потери азота, за счет предупреждения кратковременного избытка азота;

о) **Принцип 15. Максимальное ограничение контакта богатых аммонием ресурсов с воздухом играет важнейшую роль для сокращения выбросов  $\text{NH}_3$ .** Таким образом, уменьшение площади поверхности эмиссии, снижение рН, температуры и скорости ветра над поверхностью эмиссии, а также обеспечение быстрой инфильтрации в почву путем разбавления навозной жижи — все эти меры позволяют сократить выбросы  $\text{NH}_3$ ;

р) **Принцип 16. Замедление нитрификации (биологического окисления  $\text{NH}_4^+$  до  $\text{NO}_3^-$ ) может способствовать снижению потерь азота и повышению эффективности использования азота.** Это объясняется тем, что способность удерживания в почве  $\text{NH}_4^+$  выше, чем у  $\text{NO}_3^-$ , что делает это соединение менее уязвимым к потерям в результате процессов выщелачивания и нитрификации-денитрификации, чем  $\text{NO}_3^-$ ;

q) **Принцип 17. Некоторые меры, направленные на сокращение выбросов  $\text{N}_2\text{O}$ , могут также снижать потери  $\text{N}_2$  (и наоборот), поскольку и те и другие связаны с процессами денитрификации.** Поэтому меры, направленные на одновременное сокращение потерь  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$  в результате процессов нитрификации-денитрификации, могут способствовать экономии азотных ресурсов внутри системы с одновременным снижением климатических воздействий;

г) **Принцип 18. Достижение значительного сокращения выбросов  $\text{N}_2\text{O}$  в сельском хозяйстве требует особого внимания к повышению эффективности использования азота во всех элементах агропродовольственной системы с задействованием всех доступных мер.** Требование в отношении глубоких системных изменений связано с тем, что возможности конкретных технических мер по сокращению выбросов  $\text{N}_2\text{O}$  из сельскохозяйственных источников ограничены в сравнении с масштабными задачами сокращения выбросов в целях борьбы с изменением климата и снижением концентрации стратосферного озона. Это подразумевает требование учитывать общесистемные изменения во всех элементах агропродовольственной системы, включая рацион питания людей и сельскохозяйственных животных, а также управление удобрениями, биологическими и рециркулируемыми азотными ресурсами;

с) **Принцип 19. Стратегии, направленные на снижение потерь азота, фосфора и других питательных веществ в сельском хозяйстве, дают дополнительные выгоды в плане смягчения воздействия азота по сравнению со стратегиями снижения выбросов отдельных питательных веществ, поскольку они связаны с круговоротом питательных веществ.** Акцент на азот обеспечивает прагматичность подхода, который стимулирует установление взаимосвязей между многочисленными угрозами и круговоротом элементов, тем самым ускоряя прогресс;

т) **Принцип 20. Стратегии, направленные на оптимизацию совместного использования азота и воды, более эффективны, чем отдельные стратегии в области применения азотных удобрений и ирригации, особенно в полувзасушливых и засушливых условиях.** Это подчеркивает необходимость комплексного подхода, в котором наличие азота и воды рассматривается совместно, особенно в тех регионах мира, где производство продовольствия ограничено наличием воды и азота. Увязка управления азотом и водными ресурсами также лежит в основе безопасного хранения твердого навоза, которое позволяет предотвратить смыв и выщелачивание;

и) **Принцип 21. Стратегии, направленные на повышение эффективности использования азота в растениеводстве и снижение потерь азота на сельскохозяйственных угодьях, должны учитывать возможные изменения со временем содержания органического углерода (С) в почвах и качества почв, а также воздействия стратегий связывания углерода в почве.** Секвестрация углерода связана с секвестрацией азота в почвах вследствие достаточно низкого соотношения С:N в почвах. Защита органических соединений в почве от деградации

(«обеднение почвы азотом») имеет жизненно важное значение для поддержания продуктивности сельского хозяйства в регионах с низким входом азота;

v) **Принцип 22. Стратегии, направленные на сокращение выбросов азота из животного навоза путем использования низкобелковых кормов, должны учитывать возможное воздействие изменений кормового рациона на выбросы энтерального метана (CH<sub>4</sub>), продуцируемого жвачными животными.** Использование низкобелковых кормов для жвачных животных позволяет снизить экскрецию азота и улетучивание NH<sub>3</sub>, однако при этом, как правило, увеличиваются содержание волокон и выбросы CH<sub>4</sub>, что указывает на необходимость оптимизации рациона питания по азоту и углероду;

w) **Принцип 23. При определении стоимости и эффективности мер по сокращению потерь азота необходимо учитывать практические ограничения и возможности, имеющиеся у фермеров в регионе, где предполагается внедрение этих мер.** Анализ эффективности и затрат должен быть в максимально возможной степени приближен к реальным условиям ведения хозяйства и, в частности, учитывать размер хозяйства и основные экологические ограничения. При анализе эффективности затрат следует учитывать факторы, препятствующие внедрению, а также побочное воздействие применяемых методов на другие формы азота и парниковые газы, с тем чтобы содействовать получению сопутствующих выгод;

x) **Принцип 24. Уровень хозяйства зачастую является основной точкой интеграции решений по предупреждению выбросов/смягчению последствий, и общее воздействие мер по предупреждению выбросов/смягчению последствий необходимо оценивать на этом уровне,** включая учет взаимодействий в более широком масштабе на ландшафтном, региональном и трансграничном уровне.

### 3. Инструменты реализации комплексных подходов к управлению азотом

49. Инструментарий для разработки комплексных подходов к управлению азотом содержит как универсальные, так и более специфические инструменты, подходящие только для какого-либо одного аспекта комплексного подхода. Основными универсальными инструментами являются:

a) системный анализ, используемый, в частности, в интерфейсе «наука — политика — практика»;

b) инструменты расчета азотного бюджета «вход — выход» для учета источников азота и азотных соединений для четко определенных областей в различных масштабах (от фермерского хозяйства до континента), которые легко доступны для понимания фермеров и разработчиков политики (а также отвечают правилам обеспечения конфиденциальности данных);

c) модели для комплексной оценки и анализ «затраты/выгоды». В качестве отправной точки для анализа причинно-следственных связей концептуально можно использовать систему «драйвер — нагрузка — состояние — воздействие — реакция» (ДНСВР), при этом следующим шагом является анализ «затраты/выгоды» (АЗВ), который выражает затраты и выгоды мер политики в денежном эквиваленте;

d) оценка и управление пищевой цепочкой охватывают планирование и управление деятельностью, а также информационными потоками между участниками всей цепочки производства — потребления продуктов питания, включая поставщиков, переработчиков, розничные предприятия, компании, занимающиеся переработкой отходов, а также граждан;

e) диалог и коммуникация между заинтересованными сторонами имеют большое значение для обмена мнениями участников по вопросам управления N, что способствует обеспечению прозрачности концепций и упрощает принятие целевых показателей и реализацию мер на практике;

f) меры по предупреждению выбросов/смягчению последствий, включая наилучшие методы управления, которые, как показано в главах IV–VI настоящего документа, позволяют снизить уровень выбросов и воздействия.

## **В. Содержание животных в помещениях, хранение и переработка навоза**

50. Меры по сокращению потерь азота при стойловом содержании скота, хранении и переработке навоза позволяют влиять на состав навоза и условия его хранения, с тем чтобы создать условия, неблагоприятные для выбросов. Первым важным шагом является максимальная адаптация содержания азота в кормах к потребностям животных. Эту задачу можно решить с помощью пяти мер.

51. Объем выбросов  $\text{NH}_3$  будет меньше при низких температурах и низких значениях pH, а также ограниченном контакте навоза с атмосферным воздухом. Выбросы  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$  будут меньше при низком содержании органического углерода, достаточной доступности кислорода и низкой концентрации нитратов. Концепции передовой практики по сокращению негативного воздействия на окружающую среду требуют комплексных подходов, глубокого понимания механизмов образования выбросов на уровне процессов и разработки гибких решений, отвечающих региональным потребностям.

52. Следующие приоритетные меры позволяют сократить потери азота при стойловом содержании сельскохозяйственных животных:

- a) снижение температуры в животноводческом помещении, в том числе за счет оптимизации вентиляции;
- b) уменьшение площади контактной поверхности и поверхности, загрязненной навозом;
- c) уменьшение воздухопотока над загрязненными поверхностями;
- d) применение добавок (например, ингибиторов уреазы, подкисление); и
- e) регулярная откачка жидкого навоза во внешнее навозохранилище.

В целом определены 18 мер в области содержания животных (см. таблицу II.1 ниже).

53. Следующие приоритетные меры позволяют сократить потери азота и обеспечить восстановление и повторное использование азота при хранении, обработке и переработке навоза:

- a) хранение навоза в сухом месте за пределами помещения для содержания животных;
- b) хранение навозной жижи в закрытых емкостях;
- c) обработка/переработка навоза для снижения содержания сухого вещества в навозной жиже, увеличения содержания  $\text{NH}_4^+$  и снижения pH;
- d) анаэробное сбраживание, разделение твердой/жидкой фракции и подкисление навозной жижи;
- e) обеспечение эффективного использования всех имеющихся питательных ресурсов для роста сельскохозяйственных культур;
- f) улучшение поглощения и восстановления питательных веществ; и
- g) производство питательных продуктов с добавленной стоимостью на основе переработанных азотных ресурсов навоза. В общей сложности определены 12 мер в области хранения/переработки навоза, и 5 мер по восстановлению питательных веществ (см. таблицу II.1 ниже).

54. В целом меры, связанные с кормлением животных, содержанием животных, хранением навоза и его переработкой, следует рассматривать в увязке с потоком азота и других питательных веществ, при этом между различными этапами существует значительный синергизм. Например, предотвращение потерь азота благодаря оптимизации кормовых рационов и использованию систем содержания животных с низким уровнем выбросов дает возможность увеличить ресурсы азота для рециклинга навоза или непосредственного внесения на поля (глава V). Чтобы максимально усилить синергетический эффект и избежать компромиссов, важно помнить о принципах, лежащих в основе каждой меры (глава III). К примеру, для реализации всех

выгод от сокращения выбросов  $\text{NH}_3$  при стойловом содержании животных, необходимы соответствующие меры при хранении и внесении навоза, чтобы избежать выбросов  $\text{NH}_3$  в системе на более поздних этапах. Цепочка управления навозом представляет собой наглядный пример возможности реализации концепции экономики замкнутого цикла, когда снижение потерь в окружающую среду приводит к увеличению доступности ресурсов (см. рис. I.2 выше).

Таблица II.1

**Меры, связанные с кормлением, содержанием животных, хранением и переработкой навоза и восстановлением питательных веществ**

*Меры, связанные с кормлением животных*

Кормление животных — мера 1:  
Адаптация содержания белков в рационе кормления (молочный и мясной скот)

Адаптация содержания сырого протеина в рационе к потребностям животного является первой и наиболее эффективной мерой по снижению выбросов азота. Эта мера позволяет снизить экскрецию избыточного азота и, таким образом, уменьшает выбросы по всей цепочке управления навозом. Увеличение соотношения «энергия/протеин» в кормовом рационе — стратегия, которая хорошо себя зарекомендовала для снижения уровня сырого протеина. Для пастбищных систем животноводства целесообразность данной стратегии может быть ограничена, так как более старые травы могут снижать качество кормов.



Кормление животных — мера 2:  
Повышение продуктивности (молочный и мясной скот)

Повышение продуктивности молочного и мясного скота за счет увеличения надоев или суточного привеса позволяет снизить выбросы  $\text{CH}_4$  (и, возможно,  $\text{N}_2\text{O}$ ) на кг продукта<sup>5</sup>. Необходимо найти баланс между сокращением выбросов за счет повышения продуктивности и ограниченной способностью крупного рогатого скота потреблять концентраты. Способность крупного рогатого скота превращать белок из грубого, несъедобного для человека, в высококачественный белок играет важнейшую роль с точки зрения ресурсов и биоразнообразия.



Кормление животных — мера 3:  
Повышение цикла жизни (молочный скот)

Продуктивность может быть повышена путем увеличения годового надоя, а также за счет увеличения количества доильных циклов. Оптимизация рациона кормления и условий содержания позволяет увеличить цикл жизни молочного скота и, таким образом, снизить количество животных для воспроизводства поголовья, тем самым уменьшая удельные потери азота.



<sup>5</sup> Этот эффект отмечается здесь без ущерба для любой нынешней или будущей сельскохозяйственной политики (например, Общей сельскохозяйственной политики Европейского союза) и других мер государственной помощи, направленных на сохранение местных традиционных пород животных, что подчеркивает необходимость поиска баланса между различными проблемами.

Меры, связанные с кормлением животных

Кормление животных — мера 4:  
Адаптация содержания протеина  
в рационе кормления (свиньи)

Меры по кормлению в свиноводстве включают фазовое кормление, составление рационов на основе перевариваемых/доступных питательных веществ, использование низкопротеиновых рационов с добавлением аминокислот, а также кормовых добавок/дополнений. Содержание сырого протеина в рационе свиней может быть снижено за счет оптимизации снабжения аминокислотами путем добавления синтетических аминокислот.



Кормление животных — мера 5:  
Адаптация содержания протеина  
в рационе кормления (птица)

В птицеводстве потенциал сокращения экскреции азота путем мер по адаптации кормления не так велик, как в свиноводстве, поскольку на сегодняшний день в среднем эффективность преобразования уже достигла высокого уровня, а вариабельность внутри стаи птиц выше.



Меры, связанные с содержанием животных

Содержание животных — мера 1:  
Незамедлительное разделение  
мочи и фекалий (крупный  
рогатый скот)

Физическое разделение фекалий (содержащих уреазу) и мочи в системах стойлового содержания животных, позволяет замедлить гидролиз мочевины, что в свою очередь приводит к сокращению выбросов как при содержании животных, так и в процессе внесения навоза. Разделение твердой и жидкой фракций также сокращает выбросы при внесении навоза в почву, так как моча проникает в почву легче, чем перемешанная навозная жижа.



Содержание животных — мера 2:  
Регулярная очистка полов в  
животноводческих помещениях  
скреперными установками  
с зубчатыми скребками (крупный  
рогатый скот)

Поверхность эмиссии может быть уменьшена с помощью зубчатых скребков, проходящих по гофрированному полу, тем самым сокращая выбросы NH<sub>3</sub>. Это также позволяет обеспечить более чистую поверхность пола с хорошим трением, предотвращающим скольжение животных.



Содержание животных — мера 3:  
Регулярная уборка полов  
в животноводческих помещениях

Тщательная очистка зон передвижения животных в помещениях для содержания молочных коров с помощью механических скреперов или роботизированных систем позволяет значительно сократить выбросы NH<sub>3</sub>.



Содержание животных — мера 4:  
Частое удаление жидкого навоза  
(крупный рогатый скот)

Регулярное удаление жидкого навоза из-под щелевых полов в наружное навозохранилище позволяет значительно сократить выбросы  $\text{NH}_3$  за счет уменьшения площади поверхности, с которой происходят выбросы, и температуры хранения жидкого навоза. Это также сокращает выбросы  $\text{CH}_4$ , поскольку навоз хранится вне помещений, при более низких температурах.



Содержание животных — мера 5:  
Увеличение объема подстилки  
(крупный рогатый скот,  
твердый навоз)

Использование подстилочного материала, поглощающего мочу в помещении для содержания крупного рогатого скота, может сократить выбросы  $\text{NH}_3$  за счет иммобилизации азота, а также может снизить выбросы  $\text{N}_2\text{O}$ .



Содержание животных — мера 6:  
Кондиционирование воздуха  
в животноводческом помещении  
для снижения температуры  
и протока воздуха (крупный  
рогатый скот)

В животноводческих помещениях с традиционными щелевыми полами кондиционирование воздуха с охлаждением навозной жижи, теплоизоляция крыши и/или автоматическая система естественной вентиляция могут сократить выбросы  $\text{NH}_3$  за счет снижения температуры и скорости проточного воздуха, а также могут снизить выбросы  $\text{CH}_4$ .



Содержание животных — мера 7:  
Использование кислотных  
воздушных скрубберов (крупный  
рогатый скот)

При содержании крупного рогатого скота в помещениях с принудительной вентиляцией данную меру можно отнести к категории 1 мер по снижению выбросов  $\text{NH}_3$ . Однако в регионе ЕЭК в большинстве случаев крупный рогатый скот содержится в помещениях с естественной вентиляцией. В последних разработках исследуется использование воздушных скрубберов в зданиях с естественной вентиляцией (например, путем прямого отбора и очистки воздуха из жижеохранилища).



Содержание животных — мера 8:  
Подкисление жидкого навоза  
(свиньи и крупный рогатый скот)

Выбросы  $\text{NH}_3$  могут быть уменьшены путем подкисления навозной жижи для смещения баланса с  $\text{NH}_3$  на  $\text{NH}_4^+$ . Подкисление навозной жижи в животноводческом помещении позволяет сократить выбросы  $\text{NH}_3$  по всей цепочке управления навозом. Вместе с тем подкисленный серной кислотой жидкий навоз не может использоваться в качестве единственного сырья для производства биогаза (может использоваться, но в уменьшенной пропорции).



Меры, связанные с содержанием животных

- Содержание животных — мера 9: Уменьшение площади поверхности эмиссии (свиньи) — Выбросы аммиака могут быть снижены на за счет уменьшения площади поверхности, с которой происходят выбросы, путем частого и полного вакуумного дренажа жидкого навоза со дна навозосборника. Могут использоваться и другие конструкции полов, в том числе частично решетчатые полы и наклонные сточные желоба.
- Содержание животных — мера 10: Регулярная очистка полов (свиньи) — Тщательная очистка полов в свинарнике с помощью механических скреперов или роботизированных систем позволяет значительно сократить выбросы  $\text{NH}_3$ .
- Содержание животных — мера 11: Частое удаление жидкого навоза (свиньи) — Регулярное удаление жидкого навоза из-под щелевых полов в свинарнике в наружное навозохранилище позволит значительно сократить выбросы  $\text{NH}_3$  за счет уменьшения площади поверхности, с которой происходят выбросы, и температуры хранения жидкого навоза. Это также сокращает выбросы  $\text{CH}_4$ , поскольку навоз хранится вне помещений, при более низких температурах.
- Содержание животных — мера 12: Увеличение объема подстилки (свиньи, твердый навоз) — Использование в свинарнике подстильного материала, поглощающего мочу, может сократить выбросы  $\text{NH}_3$  за счет иммобилизации азота, а также снизить выбросы  $\text{N}_2\text{O}$ . Этот подход может дать положительный эффект с точки зрения обеспечения благополучия животных. Может потребоваться регулярная смена подстилки, чтобы избежать выбросов  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ , связанных с системами содержания на глубокой подстилке.
- Содержание животных — мера 13: Кондиционирование воздуха в помещениях для снижения температуры и скорости воздухопотока (свиньи) — Поверхностное охлаждение навоза вентиляторами с использованием закрытой системы теплообмена может значительно сократить выбросы  $\text{NH}_3$ . В системах на основе навозной жижи данный метод может быть реализован в существующих зданиях путем установки соответствующего оборудования.
- Содержание животных — мера 14: Использование кислотных воздушных скрубберов (свиньи) — Обработка отходящего воздуха кислотными скрубберами доказала свою практичность и эффективность, по крайней мере, в крупных хозяйствах. Наибольший экономический эффект дает установка этого оборудования в новых зданиях для содержания животных. Этот подход также помогает уменьшить неприятный запах и



выбросы PM, а также может способствовать сокращению выбросов  $N_2O$  и  $NO_x$ , если восстановленный азот используется как замена ввода азота в составе новых удобрений.

Содержание животных — мера 15:  
Использование биологических  
воздушных скрубберов (свиньи)

В биологических скрубберах очистка воздуха осуществляется с помощью бактерий, удаляющих  $NH_3$  и неприятные запахи из отходящего воздуха. Использование этого метода требует оптимального управления для обеспечения того, чтобы  $NH_3$ , улавливаемый в биологических воздушных скрубберах (например, в органических биофильтрах), не подвергался нитрификации/денитрификации, что приводит к увеличению выбросов  $N_2O$ ,  $NO_x$  и  $N_2$ . Восстановление уловленного  $N_f$  в биоскрубберах может компенсировать любое увеличение, с возможностью восстановления  $N_f$  за счет использования капельных систем.



Содержание животных — мера 16:  
Быстрое высушивание куриного  
помета

Выбросы  $NH_3$  из пометосборников при содержании птицы в клеточной батарее или в канальных системах могут быть снижены за счет вентиляции пометосборника или путем использования транспортной ленты для удаления и высушивания помета. Сохранение выделенного с экскрементами азота в виде мочевой кислоты также может способствовать снижению выбросов  $N_2O$ ,  $NO_x$  и  $N_2$ , поскольку это также замедляет процессы нитрификации и денитрификации.



Содержание животных — мера 17:  
Использование кислотных  
воздушных скрубберов (птица)

Очистка отходящего воздуха кислотными скрубберами успешно применяется для снижения выбросов  $NH_3$  в ряде стран. Основное отличие от свиарников заключается в том, что птичники, как правило, выбрасывают гораздо больше пыли. Для высоких пылевых нагрузок разработаны многоступенчатые скрубберы с предварительной фильтрацией крупнодисперсных частиц.



Содержание животных — мера 18:  
Использование биологических  
воздушных скрубберов (птица)

Очистка отходящего воздуха при помощи капельных биологических фильтров (биологических воздушных скрубберов) успешно применяется в ряде стран для снижения выбросов  $NH_3$ , мелкой пыли и устранения неприятного запаха. Многоступенчатые скрубберы были разработаны для сред с высоким запылением, однако использование биофильтров может увеличивать другие потери азота, такие как  $N_2O$ ,  $NO$  и  $N_2$ .



Меры в области хранения и переработки навоза

Управление навозом — мера 1:  
Хранение навоза в закрытом навозохранилище (плотная крышка и гидроизолированное основание)

Существует множество технологий закрытого хранения навоза и дигестата из биогаза, включая использование металлических или бетонных резервуаров с плотными крышками, плавающим покрытием на отстойниках и использование мешков для хранения навозной жижи, большинство из которых при правильной эксплуатации позволяют практически полностью устранить выбросы  $\text{NH}_3$ . Гидроизолированное основание предотвращает выщелачивание нитратов, при этом необходимо следить за его техническим состоянием во избежание утечек.



Управление навозом — мера 2:  
Хранение жидкого навоза в закрытой емкости (естественно образующаяся корка и гидроизолированное основание)

При высоком содержании сухого вещества в жидком навозе при хранении на поверхности может образовываться естественная корка, в связи с чем выбросы аммиака значительно сокращаются, однако при этом могут увеличиваться выбросы  $\text{N}_2\text{O}$ . Гидроизолированное основание предотвращает выщелачивание нитратов, при этом необходимо следить за его техническим состоянием во избежание утечек.



Управление навозом — мера 3:  
Крытое хранение твердого навоза (дисперсное покрытие)

Покрытие твердого навоза дисперсным материалом, например торфом, глиной, цеолитом и фосфогипсом или глиной, может значительно сократить выбросы  $\text{NH}_3$ . Сокращение выбросов достигается за счет предупреждения контакта поверхности навоза с воздухом, в то время как эти материалы также отличаются высоким сродством к аммонии. Покрытие должно иметь достаточную толщину.



Управление навозом — мера 4:  
Хранение твердого навоза в сухих условиях

Простое хранение навоза в сухом месте, укрытом от дождя, также может сократить выбросы азота с рядом активных форм азота и молекулярного азота  $\text{N}_2$ . Это особенно важно в случае подстилки для птиц, поскольку хранение помета в сухости помогает избежать гидролиза мочевиной кислоты с образованием  $\text{NH}_3$ .



Управление навозом — мера 5:  
Хранение твердого навоза на твердом бетонном основании со стенами

Хранение твердого навоза на твердом бетонном основании со стенами позволяет сократить выщелачивание нитратов и других форм  $\text{N}$ , путем смыва и инфильтрации в почву. Этот метод связан с меньшими затратами, чем установка плотного покрытия, однако существует риск значительных выбросов  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$ .



Меры в области хранения и переработки навоза

Управление навозом — мера 6:  
Перемешивание жидкого навоза  
(при хранении)

Перемешивание жидкого навоза в хранилище перед внесением в почву помогает обеспечить равномерное распределение питательных веществ. Дополнительные преимущества в части сокращения выбросов  $N_2O$ ,  $NO_x$  и  $N_2$  отсутствуют. Этот метод может даже увеличить потери  $NH_3$  (например, если перемешивание увеличивает pH за счет увеличения потерь  $CO_2$  из жидкого навоза), поэтому перемешивание следует проводить непосредственно перед внесением.



Управление навозом — мера 7:  
Адсорбция аммония,  
содержащегося в жидком  
навозе

Для адсорбции аммония на химической, физической или биологической основе могут использоваться определенные добавки к навозу. Такие минеральные добавки, как глина/цеолит, требуют применения в больших количествах, что может привести к удорожанию этой меры (например, 25 кг цеолита на  $m^3$  навозной жижи для адсорбции 55 % аммония). Однако эксперименты показали весьма незначительный эффект в плане сокращения выбросов  $NH_3$ . Добавление биоугля может также уменьшать выбросы  $NH_3$  в процессе хранения навоза.



Управление навозом — мера 8:  
Подкисление жидкого навоза  
(при хранении)

Выбросы аммиака из навозохранилища могут быть снижены за счет добавления кислот. Чаще всего это делается непосредственно перед вывозом на поля. Уменьшение уровня pH также позволяет снизить выбросы  $CH_4$  и, как ожидается, приведет к сокращению выбросов  $N_2O$  и  $N_2$ . Кислота может добавляться или продуцироваться на месте хранения (например, путем окисления атмосферного  $N_2$  кислородом с усилением эффекта за счет использования местных возобновляемых источников энергии). Хотя сырье для производства биогаза может содержать лишь ограниченное количество подкисленного навоза, подкисление после анаэробного сбраживания может способствовать сокращению последующих выбросов  $NH_3$ .



Управление навозом — мера 9:  
Аэрация жидкого навоза

В ходе аэрации через жидкий навоз пропускается кислород, что обеспечивает рост аэробных микроорганизмов и снижает неприятный запах. Однако при этом увеличиваются выбросы  $CO_2$  и  $NH_3$ . Также возрастают выбросы  $NO_x$  при том, что увеличение доступности  $NO_3$  может привести к последующему росту потерь  $N_2O$  и  $N_2$ , связанных с денитрификацией. Поэтому аэрация навозной жижи не рекомендуется.



Меры в области хранения и переработки навоза

Управление навозом — мера 10:  
Механическое разделение  
твердой и жидкой фракций  
жидкого навоза

В результате механической сепарации твердой и жидкой фракций навозной жижи производится богатая аммонием жидкость, которая медленнее разлагается и более эффективно проникает в почву, снижая выбросы  $\text{NH}_3$ , при более предсказуемых преимуществах применения удобрений, повышающих урожайность и позволяющих снизить количество минеральных азотных удобрений. Необходимо проявлять осторожность, чтобы избежать потерь  $\text{NH}_3$  и  $\text{CH}_4$  из твердой фракции, которые могут играть роль удобрений контролируемого действия или сырья для образования биогаза.



Управление навозом — мера 11:  
Анаэробное сбраживание

Анаэробное сбраживание, связанное с образованием биогаза  $\text{CH}_4$ , сокращает выбросы  $\text{CH}_4$  в процессе последующего хранения дигестата, заменяя при этом потребление ископаемого топлива. Содержание аммония и уровень pH в перебродившей навозной жиже выше, чем в необработанном навозе, что увеличивает потенциальные выбросы  $\text{NH}_3$ , требует использования закрытых хранилищ и применения низкоэмиссионных методов внесения навоза. В рамках комплексного пакета мер анаэробное сбраживание может снизить потери  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ , обеспечив при этом возможность применения передовых технологий восстановления питательных веществ (меры по восстановлению питательных веществ 3–5). Требование об устройстве гидроизолированного основания обусловлено необходимостью предупреждения выщелачивания нитратов, которое возможно при хранении навоза на проницаемой поверхности.



Управление навозом — мера 12:  
Компостирование навоза

Компостирование навоза позволяет получить стабильное биоудобрение без запаха с меньшим содержанием влаги, которое содержит большую часть исходных питательных веществ и не содержит патогенов и семян. Однако потери  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  зачастую могут увеличиваться, что также снижает ценность азотных удобрений, при этом компостирование на пористых субстратах рискует увеличить выщелачивание азота. Использование компостирования в системах закрытого типа может смягчить некоторые из этих последствий. Представленные категории ЕЭК ООН предполагают открытое компостирование на непроницаемой поверхности.



Рекуперация питательных веществ — мера 1: Сушка и гранулирование твердой фракции навоза

Возможно использование сушки и гранулирования твердой фракции навоза, жидкого навоза или твердого дигестата для образования более стабильного биоудобрения без неприятного запаха. Процесс сушки связан с высокими энергозатратами при высоких потерях  $\text{NH}_3$ , если не проводятся фильтрация или очистка отводимого воздуха и если твердая фракция не подкисляется перед сушкой.



Рекуперация питательных веществ — мера 2: Сжигание, газификация или пиролиз

Сжигание, термическая газификация или пиролиз навоза и твердого дигестата могут использоваться для производства энергии с положительным балансом расходуемой для выработки тепла и/или электроэнергии. Однако этот метод связан с потерями содержащегося в навозе азота, который преобразуется в газообразный  $\text{N}_2$ , а также  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$  (например,  $\text{NO}_x$ ). При отсутствии систем минимизации образования  $\text{N}_2$  и рекуперации азотсодержащих газов, эта мера не может уменьшить общие потери азота.



Рекуперация питательных веществ — мера 3: Осаждение азотсодержащих солей

Струвит ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (а также другие такие фосфорные соли, как гидроксиапатит) может осаждаться в жидком навозе, включая анаэробно сброживаемый навоз, а также жидкую фракцию, получаемую в результате сепарации дигестата. Основным преимуществом струвита является его высокая концентрация и сходство по физико-химическим свойствам с обычным минеральным азотным удобрением. Отнесение к категории 2 ЕЭК ООН отражает необходимость дальнейшей оценки эффективности.



Рекуперация питательных веществ — мера 4: Концентрирование азотсодержащих солей и растворов

Минеральные концентраты представляют собой растворы с высоким содержанием питательных веществ, которые могут быть получены путем ультрафильтрации, испарения или обратного осмоса жидкой фракции при сепарации жидкого навоза или дигестата. При условии сведения к минимуму потерь (например, использование подкисления, заделка в почву) степень замещения минеральными концентратами минеральных удобрений может быть относительно высокой, так как они схожи с коммерческими жидкими удобрениями. Поскольку эти технологии все еще находятся на этапе изучения, они в настоящее время отнесены к категории 3 ЕЭК ООН до появления результатов дополнительных оценок).



Меры по рекуперации питательных веществ

Рекуперация питательных веществ — мера 5: Отгонка и рекуперация аммиака

В этом методе жидкая фракция после сепарации навоза вступает в контакт с воздухом, после чего  $\text{NH}_3$  испаряется и рекуперируется газом-носителем. Использование мембранных систем позволяет использовать более низкие температуры, если имеется возможность предупредить загрязнение мембраны. Рекуперацию аммиака, поступающего из колонны для отгона  $\text{NH}_3$  или установки для сушки навоза, можно осуществлять с помощью мокрой очистки кислотным раствором, как правило, раствором серной или азотной кислоты. Образующиеся при этом сульфат и нитрат аммония (селитра) могут служить сырьем для производства минеральных удобрений, обеспечивая возможность развития экономики замкнутого цикла.



*Примечание:* см. рис. II.1 выше и сопроводительный текст, объясняющий систему цветowych кодов, которые используются в рис. II.1 выше и сопроводительный текст, объясняющий систему цветowych кодов, которые используются в рисунках, приведенных в таблице II.1.

### С. Внесение в почву органических и неорганических удобрений, в том числе навоза, мочи, а также других органических веществ

55. Меры по сокращению потерь азота в процессе вывоза азотных ресурсов на поля особенно важны, поскольку фермеры могут убедиться в преимуществах более эффективного использования питательных веществ. Таким образом, меры по сокращению общих потерь азота преследуют двоякую цель: сократить объем вносимых в почву удобрений и других питательных ресурсов; и уменьшить загрязнение воздуха и воды, что дает многочисленные экологические выгоды.

56. В соответствии с принципом 6 необходимо учитывать те количества азота, которые остаются в системе, благодаря мерам по содержанию животных и хранению навоза. Эти действия увеличивают количество азотных ресурсов, имеющихся в наличии для вывоза на поля, что позволяет сократить производство новых азотных удобрений.

57. Ниже перечислены наиболее эффективные меры по степени их применимости:

- a) меры по применению органических и неорганических удобрений;
- b) меры по применению навоза и других органических материалов;
- c) меры по применению неорганических удобрений;
- d) меры по выпасу животных; и
- e) другие меры, связанные с системой земледелия. В целом определены 20 полевых мер (см. таблицу II.2 ниже).

Таблица II.2

**Меры по применению органических и неорганических удобрений, навоза и других органических материалов, а также по выпасу скота**

*Меры применимые к внесению как органических, так и неорганических удобрений*

Полевая мера 1:

Комплексный план регулирования питательных веществ

Этот подход имеет целью комплексный учет всех потребностей в питательных веществах сельскохозяйственных и кормовых культур в хозяйстве за счет использования всех имеющихся источников органических и неорганических питательных веществ. Приоритет следует отдавать использованию сначала доступных источников органических питательных веществ (например, навоз домашнего скота), а оставшуюся часть потребностей покрывать за счет неорганических удобрений в соответствии с полевой мерой 3. Рекомендательные системы могут дать надежные оценки количеств азота (и других питательных веществ), поступающих в результате применения органического навоза. Эта информация, опирающаяся на результаты анализа содержания питательных веществ в почве и инструменты поддержки принятия решений для оценки потребностей растений (например, зондирование цвета листьев), может быть использована для определения норм и времени внесения дополнительных неорганических удобрений, при этом она также позволяет дополнительно сократить потребление вводимых факторов в результате сохранения в системе азота благодаря снижению потерь азота в виде загрязнения.



Полевая мера 2:

Внесение питательных веществ в надлежащих количествах

Недостаток азота снижает урожайность, содержание органического вещества в почве и может привести к обеднению почвы азотом. Чрезмерные количества азота могут также привести к снижению урожайности и прибыли, а также к переизбытку азота в почве, увеличивая риск потерь через воздух и воду. Определение необходимых количеств азота для удовлетворения потребностей сельскохозяйственных культур на экологически и экономически устойчивом уровне требует знания уровня содержания азота в органическом навозе или удобрениях, а также потребности растений в азоте. При детальном внесении удобрений может быть целесообразно тестирование почвы на поле под культурой или мониторинг цвета листьев.



Меры применимые к внесению как органических, так и неорганических удобрений

Полевая мера 3:  
Внесение питательных веществ  
в надлежащее время

Внесение азота в почву именно в то время, когда этого требует активный рост культуры, позволяет снизить риск потерь азота в воздух и воду. Многократное (или дробное) внесение снижает риск значительного выщелачивания и позволяет в дальнейшем точно рассчитать добавочные количества удобрения в соответствии с коррекцией ожидаемой урожайности. При определении времени внесения нужно учитывать климатические различия, а также прогноз погоды (например, чтобы выбрать для внесения более прохладную погоду). Следует избегать совместного внесения органической жижи и неорганических удобрений, поскольку совместное появление воды и углерода приводит к увеличению выбросов  $N_2O$ .



Полевая мера 4:  
Внесение питательных веществ  
в надлежащей форме

Эта мера в основном нацелена на сокращение выбросов  $NH_3$ , которые значительно ниже у нитрата аммония, чем у карбамидных удобрений. Если количество вносимого азота не будет уменьшено на соответствующее количество сохраненного в системе азота, то возникнет риск увеличения потерь в результате денитрификации и/или выщелачивания и смыва из-за азота, оставшегося в системе благодаря уменьшению выбросов  $NH_3$ , (глава III, принцип 6). Применительно к таким органическим материалам, как навоз домашнего скота, следует учитывать относительное содержание неорганических форм азота (например, аммония) в сравнении с органическими соединениями, так как это влияет на замещающую ценность азота.



Полевая мера 5:  
Ограничение или отказ  
от внесения удобрений  
на участках повышенного риска

Определенные участки хозяйства могут быть отнесены к категории зон повышенного риска с точки зрения потерь азота в воду, в результате прямого стока или выщелачивания, или в воздух — путем денитрификации. Загрязнение можно уменьшить путем предупреждения или ограничения использования удобрений на этих участках (например, вблизи канав и ручьев и на крутых склонах).



Полевая мера 6:  
Ленточное внесение навозной жижи и внесение с помощью волоочильного башмака

Сокращение общей площади поверхности навозной жижи путем ее внесения узкими полосами позволяет сократить выбросы аммиака на 30–35 % в сравнении с разбросным внесением, особенно в дневное время, когда условия для испарения являются более благоприятными. Кроме того, при подъярусном внесении навозной жижи ярус растений будет также представлять собой физическую преграду, которая дополнительно снизит потери аммиака (на 60 %).



Полевая мера 7:  
Внесение навозной жижи инжектором

Внесение навозной жижи в узкие поверхностные борозды в почве путем неглубокого или глубокого инъецирования позволяет значительно сократить площадь открытой поверхности жижи и существенно сократить выбросы NH<sub>3</sub> (на 70–90 %). Выбросы N<sub>2</sub>O (а также выбросы NO<sub>x</sub> и N<sub>2</sub>) могут увеличиваться, однако этот риск может быть снижен путем компенсации количества азота, который был сохранен в системе за счет сокращения выбросов NH<sub>3</sub> путем снижения количества вносимой навозной жижи.



Полевая мера 8:  
Разбавление навозной жижи для внесения в почву

Потери аммиака после разбросного внесения навозной жижи будут ниже в случае навозной жижи с меньшим содержанием сухого вещества из-за более высокой скорости инфильтрации в почву. Сокращение выбросов аммиака будет зависеть от характеристик неразбавленной навозной жижи, а также от почвенных и погодных условий на момент внесения (сокращение выбросов примерно на 30 % при разбавлении навозной жижи в воде в соотношении 1:1).



Полевая мера 9:  
Подкисление навозной жижи (во время внесения в поля)

При более низких значениях pH аммиачный азот содержится в растворе преимущественно в виде аммония, а не аммиака, что снижает скорость улетучивания аммиака. Как правило, для снижения pH используется серная кислота, хотя могут использоваться и другие кислоты. При добавлении кислоты в процессе внесения в почву навозной жижи необходимо соблюдать соответствующие правила безопасности.



Меры, связанные с внесением навоза и других органических материалов

Полевая мера 10:  
Ингибиторы нитрификации  
(добавки к навозной жиже)

Хотя обычно ингибиторы нитрификации используются с минеральными удобрениями, их можно также применять в качестве добавки к жидкому навозу домашнего скота непосредственно перед внесением в почву для замедления процесса преобразования содержащегося в жиже аммония в нитрат, который более подвержен потерям  $N_f$  через денитрификацию, смыв и выщелачивание<sup>6</sup>.



Полевая мера 11:  
Быстрая запашка навоза  
в почву

Быстрая заделка вносимого навоза в почву (в течение первых нескольких часов после внесения) позволяет сократить площадь контактирующей с воздухом поверхности навоза, с которой происходит улетучивание  $NH_3$ , а также уменьшить потери азота и фосфора в результате смыва. Данная мера применяется только на пахотных полях, на которые навоз вывозится до укоренения растений.



Меры, связанные с внесением неорганических удобрений

Полевая мера 12:  
Замена мочевины альтернативным  
азотным удобрением

После внесения в почву мочевины разлагается в процессе гидролиза с образованием карбоната аммония, что приводит к местному повышению pH, создавая благоприятные условия для выбросов  $NH_3$ . Напротив, в случае использования таких форм удобрений, как нитрат аммония, наблюдается иная картина: аммоний будет находиться в равновесии при гораздо более низком значении pH, что значительно снижает вероятность улетучивания аммиака. На известковых и полужасушливых почвах замена карбамида на нитрат аммония или нитрат кальция-аммония обычно также приводит к снижению содержания  $N_2O$  и  $NO_x$ , хотя в других условиях может произойти обратный процесс.



Полевая мера 13:  
Ингибиторы уреазы

Ингибиторы уреазы замедляют гидролиз мочевины, подавляя активность фермента уреазы в почве. Это дает больше времени для внесения мочевины в почву и для ее усвоения растениями, тем самым снижая возможные выбросы  $NH_3$ . В ряде исследований (например, в условиях нитрификации) было обнаружено, что



<sup>6</sup> Использование ингибиторов уреазы при внесении навоза крупного рогатого скота и свиней не даст никакого эффекта, так как большая часть экскретируемой мочевины при содержании скота и хранении навоза уже будет гидролизована до образования аммония. Следует учитывать возможность долгосрочного воздействия ингибиторов нитрификации на нецелевые организмы.

ингибиторы активности уреазы также уменьшают выбросы  $N_2O$  и  $NO_x$  в почву<sup>7</sup>.

Полевая мера 14:  
Ингибиторы нитрификации  
(с неорганическими удобрениями)

Ингибиторы нитрификации — это химические вещества (синтетические или естественные), которые могут быть включены в состав удобрений на основе  $NH_3$  или мочевины в целях замедления скорости перехода аммония в нитрат. Известно, что они уменьшают выбросы  $N_2O$ , а также могут снижать выбросы  $NO_x$  и  $N_2$  и потери нитратов при выщелачивании, так как они образуются в результате одних и тех же процессов. Следует учитывать возможность долгосрочного воздействия ингибиторов нитрификации на нецелевые организмы. Полевые меры 13 и 14 являются взаимодополняющими и могут использоваться совместно.



Полевая мера 15:  
Удобрения контролируемого действия

Специальные покрытия на удобрениях замедляют высвобождение питательных веществ в почву на период в несколько месяцев (например, сера или полимерные покрытия). Постепенное высвобождение питательных веществ позволяет уменьшить и потери азота путем выщелачивания и улетучивания. Органические азотные продукты с низкой растворимостью в воде, такие как изобутилидендикарбамид (IBDU), кротонилидендикарбамид (CDU) и полимеры метиленмочевины, также являются удобрениями с низкой скоростью действия. Пока еще недостаточно изучены последствия разложения полимерных покрытий, которое сопровождается образованием микропластиков.



Полевая мера 16:  
Фертигация

В районах, подверженных засухе, или с низкой доступностью воды в почве эффективность использования воды и азота следует регулировать совместно. Капельное орошение в сочетании с дробным внесением растворенного в оросительной воде азотного удобрения (например, капельная фертигация) обеспечивает прецизионное (по месту и времени) внесение удобрений, которое позволяет свести к минимуму потери воды с испарением и потери азота в воздух и воду, тем самым значительно повышая эффективность использования азота.



<sup>7</sup> См. сноску 6.

Меры, связанные с внесением неорганических удобрений

Полевая мера 17:  
Прецизионные методы внесения удобрений, включая глубокую заделку

Внесение азотных и фосфорных удобрений в почву непосредственно вблизи корневой зоны растения может способствовать усвоению азота и фосфора, снижению потерь азота через воздух и азота и фосфора через воду, а также снижению общих потребностей в азоте и фосфоре по сравнению с разбросным внесением. Заделка в почву снижает потери в результате улетучивания  $\text{NH}_3$ .



Меры, касающиеся выпаса скота

Полевая мера 18:  
Продление сезона выпаса

При пастбищном содержании скота благодаря быстрой инфильтрации мочи в почву образуется значительно меньше выбросов аммиака, чем при хранении и использовании навоза (например, стойлового навоза). Там, где это позволяют климатические и почвенные условия, продление сезона выпаса приводит к тому, что более значительная часть экскрементов будет рециркулироваться через навоз и мочу в процессе выпаса, тем самым сокращая выбросы  $\text{NH}_3$ . Если не принимать дополнительных мер, то могут возрасти риски вымывания нитратов и потери при денитрификации (как  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ ).



Полевая мера 19:  
Предупреждение выпаса животных в зонах с высоким уровнем риска

К зонам высокого риска относятся территории, активно взаимодействующие с уязвимыми поверхностными и/или подземными водами, а также районы, подверженные опасности заболачивания, вытаптывания растительного покрова и уплотнения почвы. К ним относятся районы с существенно увеличенным потенциалом потерь N, P и патогенов из навоза и мочи в результате смыва и денитрификации. Такие территории должны быть огорожены, либо тщательно контролироваться, чтобы исключить выпас на них скота.



Полевая мера 20:  
Ингибиторы нитрификации — добавки для обработки участков концентрации мочи

Ингибиторы нитрификации, которые обычно применяют с минеральными удобрениями, могут также использоваться для снижения скорости выщелачивания и денитрификации в местах выделения мочи животными на выпасных угодьях. Риск увеличения выбросов  $\text{NH}_3$  в местах выделения мочи животными, связанный с возможным замедлением процесса нитрификации, скорее всего, будет минимальным из-за быстрой инфильтрации мочи в почву.



## D. Землепользование и управление ландшафтом

58. Управление ландшафтом позволяет решать проблемы загрязнения  $N_r$  именно в тех зонах и в то время, где и когда они возникают, что обеспечивает достижение желаемого эффекта снижения выбросов азота.

59. Ландшафтные меры могут быть экономически более привлекательными в сравнении с мерами других типов, особенно с учетом того, что их можно использовать вне сельскохозяйственных зон, т. е. не затрагивая сельскохозяйственное производство, но создавая при этом новые природные и рекреационные ресурсы в виде защитных полос насаждений, лесов и обширных буферных зон вокруг полей, вдоль ручьев или водно-болотных угодий.

60. В части мер в области землепользования и управления ландшафтом основное внимание уделяется устранению неблагоприятных последствий, хотя эти меры могут принести пользу и в плане сокращения выбросов. По сути, эти меры направлены на повышение общей устойчивости ландшафтов, чтобы уменьшить негативное воздействие на единицу выбросов в дополнение к сокращению выбросов (например, за счет местного поглощения загрязнителей в компонентах местного ландшафта).

61. В таблице II.3 ниже перечислены наиболее эффективные меры по степени их применимости. В общей сложности выделяют 16 ландшафтных мер.

Таблица II.3

### Меры по управлению ландшафтом

Меры в области землепользования, касающиеся производства сельскохозяйственных культур и севооборота, включая агролесоводство

Управление ландшафтом — мера 1: Увеличение площадей под многолетними культурами

Использование многолетних культур, преимущественно злаковых или злаковоклеверных смесей, в частности на лугопастбищных угодьях, может снизить риск потерь  $N_r$  в окружающую среду в результате иммобилизации  $N_r$  в растительной биомассе и подстилке. Эти культуры обычно обладают повышенной способностью к хранению в биомассе/подстилке и отличаются более длительным периодом поглощения азота, чем однолетние растения. Этот подход также увеличивает запасы азота (и углерода) в почве, при этом более высокое содержание органического углерода в почве обеспечивает повышенную способность удержания  $N_r$ .



Управление ландшафтом — мера 2: Использование промежуточных культур в севообороте на пахотных землях

Промежуточные культуры (или «ловчие культуры»), засеваемые после основной культуры, могут помочь снизить имеющиеся уровни азота в почве в периоды повышенного риска выщелачивания нитрата путем поглощения азота, образующегося в результате послеуборочного разложения и минерализации. Успешное сокращение выбросов и повышение эффективности использования азота на протяжении всего цикла возделывания зависит от эффективности управления остатками промежуточных культур и соответствующей коррекции норм



Меры в области землепользования, касающиеся производства сельскохозяйственных культур и севооборота, включая агролесоводство

внесения удобрений под последующую культуру. Этот подход также снижает риск эрозии и других видов переноса почвы/питательных веществ в водотоки.

Управление ландшафтом — мера 3:  
Включение  $N_2$ -фиксирующих культур в севооборот (в том числе уплотнение культур)

Включение таких растений (например, бобовых), которые фиксируют атмосферный  $N_2$  и превращают его в органические формы азота, снижает потребность во внесении азота (в виде удобрения или навоза) и уменьшает потери азота, связанные с таким внесением. Этот подход может быть реализован путем включения бобовых в севооборот или путем их включения в смешанную культуру (посадка в междурядьях, например, злаковоклеверной смеси). Использование бобовых в качестве севооборотной культуры приводит к активизации минерализации, что может стать причиной выбросов  $N_f$  в воздух и выщелачиванию нитрата в воду.



Управление ландшафтом — мера 4:  
Внедрение агролесоводства и использование деревьев в ландшафте

Внедрение агролесоводческих методов землепользования с чередованием полос деревьев и однолетних культур или групп деревьев в ландшафте может помочь удалить излишки  $N_f$  с соседних пахотных полей, свести к минимуму эрозию, обеспечить ветрозащиту и способствовать биоразнообразию.



Ландшафтные меры по управлению прибрежными районами и водоемами

Управление ландшафтом — мера 5:  
Искусственные водно-болотные угодья для стимулирования удаления  $N_f$

Искусственные водно-болотные массивы позволяют удалять питательные вещества из водоемов и производить очистку сточных вод. Принцип функционирования искусственных водно-болотных массивов заключается в создании анаэробных условий, способствующих денитрификации до  $N_2$  и накоплению других биогенных веществ. Этот подход отличается экономичностью, однако может приводить к потерям  $N_f$  в форме  $N_2O$  и связан с риском увеличения выбросов  $N_2O$  и  $CH_4$ , а также вымыванию из почв растворенного органического C и N в водотоки.



Управление ландшафтом — мера 6:  
Высадка болотных культур в прибрежных районах или в искусственных водно-болотных массивах

Водные и болотные растения специально высаживаются для максимизации роста биомассы, что позволяет удалять  $N_f$  из воды. Затем биомассу можно собирать и использовать, например в качестве источника биоэнергии. Неэффективно управляемые системы могут увеличивать выбросы  $N_2O$  и  $N_2$  (а также выбросы  $CH_4$ ), если  $N_f$  не полностью используется для



роста растений. Эффективность сравнивается с ландшафтной мерой 5 в качестве эталонной.

Управление ландшафтом — мера 7: Использование слоев органических веществ для интенсификации денитрификации

Слой органического вещества (например, древесной щепы) засыпается в траншеи в почве в ключевых точках ландшафта для активизации процесса денитрификации, что стимулирует удаление нитратов из грунтовых и поверхностных вод. Этот подход позволяет улучшить качество воды, однако приводит к потерям  $N_f$ -ресурсов в виде выбросов  $N_2$ , а также увеличивает риск выбросов  $N_2O$  и  $CH_4$ .



Управление ландшафтом — мера 8: Управление дренажом

Дренажные меры (такие, как обустройство дренажных труб для управления грунтовыми водами) способствуют стоку и препятствуют заболачиванию, сокращая время удержания питательных веществ. Это позволяет снижать выбросы соединений  $CH_4$  и  $N$ , связанных с денитрификацией ( $N_2O$ ,  $N_2$ ), при этом сокращение времени удержания может увеличить потери  $NO_3^-$  и углерода в результате вымывания в речные воды.



Управление ландшафтом — мера 9: Стимулирование удаления  $N_f$  из прибрежных вод

Уже высказывались предложения о том, что выращивание морских водорослей и морской травы, устричные фермы и аквакультура моллюсков могут использоваться для удаления излишков питательных веществ из прибрежных акваторий. Азот входит в состав собираемой биомассы. Хотя принцип поощрения трансформации  $N_f$  в полезные продукты является вполне разумным, необходимы дополнительные количественные данные о функционировании этой системы, прежде чем можно будет уверенно поддержать ее более широкое внедрение в целях смягчения последствий загрязнения прибрежных вод.



Облесение, временное выведение земель из сельскохозяйственного оборота и создание лесополос для смягчения последствий выбросов  $N_f$

Управление ландшафтом — мера 10: Посадка деревьев в целях облесения и создания лесозащитных полос в ландшафте

Лесопосадки, а также сохранение и посадка защитных полос вокруг сельскохозяйственных полей могут уменьшить выщелачивание  $NO_3^-$  и весьма позитивно влияют на биоразнообразие. Эффективность лесополос для удержания  $N_f$  зависит от их размера и расположения, количества  $NO_3^-$  в почве и грунтовых водах, от гидрологического режима и времени. При достаточной площади посадок могут также снижаться выбросы  $NH_3$  (см. ландшафтную меру 12).



Облесение, временное выведение земель из сельскохозяйственного оборота и создание лесополос для смягчения последствий выбросов  $N_r$

Управление ландшафтом — мера 11: Резервные и другие неудобряемые луговые угодья. Неудобряемые луга (например, «резервные» луговые угодья) обладают способностью удалять  $NO_3^-$  из латерально направленных потоков влаги в почве и могут использоваться в качестве буфера для защиты прилегающих естественных земельных и водных ресурсов. Эффективность этой меры также зависит от степени сокращения общих азотных поступлений в компонентах ландшафта.



Смягчение последствий воздействия каскада  $N_r$ , связанных с местами сосредоточения домашнего скота

Управление ландшафтом — мера 12: Защитные пояса вокруг крупных точечных источников. Широкие зеленые защитные пояса, такие как лесные насаждения, устроенные вокруг точечных источников, могут снизить рассеивание  $N_r$  из крупных очагов выбросов, таких как навозохранилища или животноводческие помещения, благодаря тому, что деревья могут действовать в качестве биофильтров для  $NH_3$ , а также и иммобилизации  $N_r$  в биомассе растений и органических веществах в почве. Такой подход также может снизить потери при выщелачивании  $NO_3^-$ , но может привести к увеличению выбросов  $N_2O$ .



Управление ландшафтом — мера 13: Экологически рациональное размещение животноводческих объектов и животных на пастбищном содержании. Размещение животноводческих объектов вдали от чувствительных наземных сред обитания или водных объектов может уменьшить локальные проблемы, связанные с  $N_r$ . Этот подход чаще всего используется при планировании строительства новых объектов в рамках расширения существующих хозяйств.



«Умные» системы ведения ландшафтного хозяйства с точки зрения смягчения последствий выбросов  $N_r$

Управление ландшафтом — мера 14: Цифровое планирование землепользования на основе оценки пригодности земель. Оптимизировать использование удобрений, снизить вымывание азота и другие потери можно при помощи планирования землепользования и сельскохозяйственного производства на основе цифровых трехмерных высокоточных карт удержания азота. Такое планирование позволяет улучшить удержание биогенных веществ в элементах ландшафта, повысить качество поверхностных и грунтовых вод и снизить газообразные потери  $N_r$ . Данный подход, как правило, требует поддержки с помощью детального моделирования.



Управление ландшафтом — мера 15: Смешанное сельское хозяйство сочетает в себе животноводство и растениеводство в масштабе отдельных хозяйств и всего ландшафта. Сочетание производства растениеводческой и животноводческой продукции дает возможность увязать поступление азота с его излишками с целью сокращения общих уровней азотного загрязнения, одновременно повышая эффективность использования азота в масштабах отдельных хозяйств и ландшафта. Также обеспечивается сокращение выбросов, связанных с транспортировкой на большие расстояния кормов и навоза. Системы смешанного сельского хозяйства, объединяющие растениеводство и животноводство, также дают возможность развивать свободновыгульное животноводство в сочетании с выращиванием культур, которые снижают потери  $N_r$ .



Управление ландшафтом — мера 16: Технические меры могут применяться избирательно на ландшафтном уровне, где они целенаправленно используются в конкретных чувствительных зонах. Проведение анализа в ландшафтном масштабе также позволяет более детально оценить потенциальные плюсы и минусы и синергические связи между сокращением выбросов и снижением выбросов различных соединений азота.



## Е. Общие приоритеты для разработчиков политики

62. Разработчикам политики следует четко понимать, что в основе каждой меры лежит один или несколько из перечисленных принципов комплексного устойчивого управления азотом, как это показано в таблице II.4 ниже.

63. Применительно к содержанию животных и хранению навоза определены следующие приоритеты:

а) концепции, определяющие передовую практику в области снижения негативного воздействия на окружающую среду, включая учет следующих взаимосвязей:

- i) между загрязнителями;
- ii) с аспектами благополучия животных;
- iii) с изменением климата;
- iv) с защитой биоразнообразия; и
- v) с особенностями, характерными для данного региона.

б) концепции по сокращению негативного воздействия на окружающую среду требуют глубокого понимания на уровне процессов для оценки выбросов, контролируемых факторов и выбора мер по их предупреждению/смягчению последствий;

с) концепции уменьшения негативного воздействия на окружающую среду зависят от разработки гибких концепций, учитывающих климатические условия и специфику местности, три составляющие устойчивости, потенциальные конфликты интересов и общесистемные решения.

Таблица II.4

**Краткое описание мер в поддержку комплексного устойчивого управления азотом в сельском хозяйстве и их связь с принципами, на которых они основаны**

Меры		Соответствующие принципы, лежащие в основе перечисленных мер	
Номер меры	Описание мер	Номер принципа	Описание и применение принципов
<i>Кормление, содержание животных, управлением навозом и восстановлением питательных веществ</i>			
Кормление животных — меры 1, 4 и 5	Адаптация потребления белков в рационе питания (крупный рогатый скот, свиньи, птица)	Принцип 5 Принцип 22 Принцип 4	Управление поступлением N влияет на все каналы потери N. Стратегии кормления в отношении N учитывают взаимодействия C и CH <sub>4</sub> . Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики.
Кормление животных — мера 2	Повышение продуктивности (молочный и мясной скот)	Принцип 13	Оптимизации производства продукции животноводства требует обеспечения сбалансированности всех факторов.
Кормление животных — мера 3	Увеличение цикла жизни (молочный скот)	Принцип 13	Оптимизации производства продукции животноводства требует, чтобы все факторы были сбалансированы.
Содержание животных — мера 1 и Управление навозом — мера 10	Незамедлительное разделение мочи и фекалий (крупный рогатый скот) Механическое разделение	Принцип 14 Принцип 15	Снижение скорости гидролиза мочевины. Сведение к минимуму контакта NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -содержащих ресурсов с воздухом за счет увеличения скорости инфильтрации в почву.
Содержание животных — меры 2, 3, 9 и 10	Уменьшение поверхности эмиссии и регулярная очистка полов (крупный рогатый скот, свиньи)	Принцип 15	Сведение к минимуму контакта NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -содержащих ресурсов с воздухом, в том числе за счет снижения температуры.
Содержание животных — меры 4 и 11	Частое удаление навозной жижи (крупный рогатый скот, свиньи)	Принцип 15	Сведение к минимуму контакта NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -содержащих ресурсов с воздухом, плюс выигрыш за счет снижения температуры и площади поверхности.
Содержание животных — меры 5 и 12	Увеличение количества материала подстилки (крупный рогатый скот и свиньи с твердым навозом)	Принцип 7	Баланс «вход — выход» по азоту с повышенным сохранением за счет поглощения азота материалом подстилки.
Содержание животных — меры 6 и 13	Кондиционирование воздуха в помещении для содержания животных (крупный рогатый скот, свиньи)	Принцип 15	Сведение к минимуму контакта NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -содержащих ресурсов с воздухом за счет снижения температуры и воздушного потока.
Содержание животных — меры 7, 14 и 17	Кислотные воздухоочистители (крупный рогатый скот, свиньи, птица)	Принцип 7	Баланс «вход — выход» по азоту с учетом азота, уловленного скрубберами.

<i>Меры</i>		<i>Соответствующие принципы, лежащие в основе перечисленных мер</i>	
<i>Номер меры</i>	<i>Описание мер</i>	<i>Номер принципа</i>	<i>Описание и применение принципов</i>
<i>Кормление, содержание животных, управлением навозом и восстановлением питательных веществ</i>			
Содержание животных — мера 8	Подкисление навозной жижи (свиньи и крупный рогатый скот)	Принцип 15	Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом за счет снижения показателя pH.
Содержание животных — меры 15 и 18	Биологические воздухоочистители (свиньи и птица)	Принцип 7 contra Принцип 16 Принцип 4	Баланс «вход — выход» по азоту с учетом азота, уловленного скрубберами. Увеличение рисков денитрификации других потерь азота и снижение ЭИА. Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики.
Содержание животных — мера 16	Быстрая сушка птичьего помета	Принцип 14 Принцип 16	Снижение скорости гидролиза мочевины Подавление нитрификации.
Управление навозом — мера 1	Закрытое хранилище (сплошная крышка и непроницаемое основание)	Принцип 15 Принцип 20	Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом. Увязывание азотного и водного циклов: предотвращение вымывания дождем и стоков из навозохранилищ.
Управление навозом — мера 2	Закрытое хранилище для навозной жижи (сплошная крышка и непроницаемое основание)	Принцип 15 Принцип 20 contra Принцип 16 Принцип 4	Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом. Увязывание азотного и водного циклов: предотвращение вымывания дождем и стоков из навозохранилищ. Усиление денитрификации увеличивает риск других потерь азота и снижения ЭИА. Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики.
Управление навозом — мера 3	Крытое хранение твердого навоза (дисперсные покрытия)	Принцип 15 contra Принцип 16	Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом. Усиление денитрификации увеличивает риск других потерь азота и снижения ЭИА. Может сочетаться с мерой 5 по хранению и обработке навоза.
Управление навозом — мера 4	Хранение твердого навоза в сухих условиях	Принцип 16 Принцип 20	Снижение скорости нитрификации и денитрификации. Увязывание азотного и водного циклов: предотвращение вымывания дождем и стоков из навозохранилищ.
Управление навозом — мера 5	Хранение навоза на бетонном основании со стенами	Принцип 20 contra Принцип 15 contra Принцип 16 Принцип 4	Увязывание азотного и водного циклов: предотвращение вымывания дождем и стоков из навозохранилищ. Контактирование $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом увеличивает выбросы $\text{NH}_3$ . Усиление денитрификации увеличивает риск других потерь азота и снижения ЭИА. Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики.
Управление навозом — мера 6	Перемешивание жидкого навоза	Принцип 9 contra Принцип 15	Управление пространственными вариациями: хорошее перемешивание жидкого навоза обеспечивает более надежную норму нанесения. Контактирование $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом увеличивает выбросы $\text{NH}_3$ .

<i>Меры</i>		<i>Соответствующие принципы, лежащие в основе перечисленных мер</i>	
<i>Номер меры</i>	<i>Описание мер</i>	<i>Номер принципа</i>	<i>Описание и применение принципов</i>
<i>Кормление, содержание животных, управлением навозом и восстановлением питательных веществ</i>			
Управление навозом — мера 7	Присадки для адсорбции аммония в жидком навозе	Принцип 7	Баланс «вход — выход» по азоту с повышенным сохранением за счет поглощения азота материалом подстилки.
Управление навозом — мера 8	Подкисление жидкого навоза	Принцип 15	Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом за счет снижения показателя pH.
Управление навозом — мера 9	Аэрация жидкого навоза для уменьшения неприятного запаха	contra Принцип 15 contra Принцип 16 Принцип 4	Контактирование $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом увеличивает выбросы $\text{NH}_3$ . Усиление денитрификации увеличивает риск других потерь азота и снижения ЭИА. Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики.
Управление навозом — мера 11	Анаэробное сбраживание навоза	Принцип 6 Принцип 15 Принцип 16 Принцип 18 Принцип 19	Меры по сокращению одной формы загрязнения оставляют в сельскохозяйственной системе больше азота, который требует соответствующего управления. Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом. Подавление нитрификации. Может увеличить ЭИА всей системы путем содействия восстановлению и повторному использованию N. Побочные выгоды от повторного использования других питательных веществ и $\text{CH}_4$ .
Управление навозом — мера 12	Компостирование навоза для получения удобрений без запаха	Принцип 19 contra Принцип 15 contra Принцип 16 Принцип 4	Побочные выгоды от повторного использования других питательных веществ. Контактирование $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом увеличивает выбросы $\text{NH}_3$ . Усиление денитрификации увеличивает риск других потерь азота и снижения ЭИА. Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики.
Рекуперация питательных веществ — мера 1	Сушка и гранулирование твердой фракции навоза	Принцип 19 contra Принцип 15 Принцип 4	Побочные выгоды от повторного использования других питательных веществ. Контактирование $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом увеличивает выбросы $\text{NH}_3$ . Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики.
Рекуперация питательных веществ — мера 2	Сжигание, газификация или пиролиз	Принцип 4 contra Принцип 6 contra Принцип 16	Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики (например, биоэнергетика или загрязнение азотом). Сжигание уничтожает ресурсы N, снижает ЭИА для всей системы (если не происходит преобразования в восстанавливаемую форму $\text{N}_2$ ). Усиление денитрификации увеличивает риск других потерь азота и снижения ЭИА.
Рекуперация питательных веществ — меры 3 и 4	Осаждение солей N Концентрация растворов N	Принцип 6 Принцип 18 Принцип 19	Меры по сокращению одной формы загрязнения оставляют в сельскохозяйственной системе больше доступного азота, который требует соответствующего управления. Увеличивает ЭИА всей системы путем содействия восстановлению и повторному использованию N.

<i>Меры</i>		<i>Соответствующие принципы, лежащие в основе перечисленных мер</i>	
<i>Номер меры</i>	<i>Описание мер</i>	<i>Номер принципа</i>	<i>Описание и применение принципов</i>
<i>Кормление, содержание животных, управлением навозом и восстановлением питательных веществ</i>			
Рекуперация питательных веществ — мера 5	Отгонка и рекуперация аммиака	Принцип 6 Контролируемое использование принципа 15 Принцип 18	Побочные выгоды от повторного использования других питательных веществ. Меры по сокращению одной формы загрязнения оставляют в сельскохозяйственной системе больше доступного азота, который требует соответствующего управления. Контактирование $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом с высоким показателем рН и температурой увеличивает эмиссию $\text{NH}_3$ (которые повторно улавливаются). Увеличивает ЭИА всей системы путем содействия восстановлению и повторному использованию N.
<b>Полевое применение</b>			
Полевая мера 1	Комплексный план регулирования питательных веществ	Применяются все принципы, в том числе: Принцип 2 Принцип 5 Принцип 6 Принцип 7 Принцип 8 Принцип 9	В управлении N должны участвовать многие субъекты: договоренности между многими субъектами должны опираться на четко задокументированный план. Управление поступлением N влияет на все каналы потери N. Меры по сокращению одной формы загрязнения оставляют в сельскохозяйственной системе больше доступного азота, который требует соответствующего управления. Баланс «ввод — вывод» по азоту служит основой для оптимизации азота и экономики. Обеспечение соответствия вводимых количеств азота потребностям сельскохозяйственных растений и животных позволяет снизить все потери азота. Пространственно-эксплицитное управление в целях обеспечения соответствия потребностей в N и уязвимостям в пределах поля и между полями.
Полевые меры 2 и 3	Внесение питательных веществ в необходимых количествах и в соответствующее время	Принцип 5 Принцип 6 Принцип 7 Принцип 8	Управление поступлением N влияет на все каналы потери N. Меры по сокращению одной формы загрязнения оставляют в сельскохозяйственной системе больше доступного азота, который требует соответствующего управления. Баланс «ввод — вывод» по азоту служит основой для оптимизации азота и экономики. Обеспечение соответствия вводимых количеств азота потребностям сельскохозяйственных растений и животных позволяет снизить все потери азота.
Полевая мера 4	Внесение питательных веществ в надлежащей форме	Принцип 14 Принцип 16 Принцип 17	Снижение скорости гидролиза мочевины. Снижение скорости нитрификации. Формы ввода азота, уменьшающие потери $\text{N}_2\text{O}$ , могут также уменьшить потери $\text{N}_2$ , так как оба процесса зависят от скорости денитрификации.
Полевая мера 5	Ограничение или неприменение удобрений в зонах повышенного риска	Принцип 9 Принцип 10	Пространственные вариации сельскохозяйственных угодий требуют пространственно-эксплицитного управления азотом. Пространственные вариации чувствительности природных сред обитания требуют

Меры		Соответствующие принципы, лежащие в основе перечисленных мер	
Номер меры	Описание мер	Номер принципа	Описание и применение принципов
<i>Кормление, содержание животных, управлением навозом и восстановлением питательных веществ</i>			
			пространственно-эксплицитного управления азотом.
Полевая мера 6	Ленточное внесение навозной жижи и внесение с помощью волоочильного башмака	Принцип 15 Принцип 6	Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом. Меры по сокращению одной формы загрязнения оставляют в сельскохозяйственной системе больше доступного азота, который требует соответствующего управления.
Полевые меры 7 и 11	Подкисление жидкого навоза Быстрая заделка навоза	Принцип 15 Принцип 6	Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом. Меры по сокращению одной формы загрязнения оставляют в сельскохозяйственной системе больше доступного азота, который требует соответствующего управления.
Полевая мера 8	Разбавление навозной жижи для внесения в почву	Принцип 15 Принцип 20 Принцип 4	Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом за счет увеличения скорости инфильтрации в почву. Увязывание азотного и водного циклов: возможен риск повышенного выщелачивания $\text{NO}_3^-$ , если не будут приняты меры по интегрированию с управлением системами орошения. Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики.
Полевая мера 9	Подкисление навозной жижи (при внесении)	Принцип 15	Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом за счет снижения показателя pH.
Полевые меры 10, 14 и 20	Ингибиторы нитрификации (навозная жижа, удобрения и моча)	Принцип 16 Принцип 17	Подавление процессов нитрификации и денитрификации снижает потери азота и увеличивает ЭИА. Снижение потерь $\text{N}_2\text{O}$ может также уменьшить потери $\text{N}_2$ .
Полевая мера 12	Заменить карбамид на другое азотное удобрение	Принцип 15	Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом путем предотвращения пиковых значений pH, связанных с гидролизом мочевины.
Полевая мера 13	Ингибиторы уреазы: добавка к удобрениям на основе мочевины	Принцип 14	Снижение скорости гидролиза мочевины.
Полевая мера 15	Удобрения контролируемого действия	Принцип 8	Обеспечение соответствия количеств вводимого азота потребностям растений за счет оптимизации времени доступности азота.
Полевая мера 16	Фертигация	Принцип 20	Совместная оптимизация азотного и водного циклов увеличивает эффективное потребление питательных веществ и снижает потери азота.
Полевая мера 17	Точные методы внесения удобрений, включая глубокое внесение	Принцип 12 Принцип 15	Оптимизация азотного и водного циклов увеличивает эффективное потребление питательных веществ и снижает потери азота. Оптимизация продуктивности растений и ЭИА требует одновременного учета всех определяющих и ограничивающих факторов.

Меры		Соответствующие принципы, лежащие в основе перечисленных мер	
Номер меры	Описание мер	Номер принципа	Описание и применение принципов
<i>Кормление, содержание животных, управлением навозом и восстановлением питательных веществ</i>			
Полевая мера 18	Продление периода пастбищного содержания	Принцип 15 contra Принцип 16 Принцип 4	Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом.  Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом, так как скорость инфильтрации в почву у мочи выше, чем у навоза и навозной жижи. Увеличение рисков денитрификации других потерь азота и снижение ЭИА. Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики.
Полевая мера 19	Не допускать выпас в зонах с высоким риском заболачивания и стока	Принцип 9 Принцип 10	Пространственные вариации сельскохозяйственных угодий требуют пространственно-явного управления азотом. Пространственные вариации чувствительности природных сред обитания требуют пространственно-явного управления азотом.
<b>Землепользование и управление ландшафтом</b>			
Управление ландшафтом — мера 1	Увеличение площадей под многолетними культурами	Принцип 7 Принцип 16 Принцип 20	Многолетние культуры позволяют запастись больше углерода и азота в биомассе и почве, сокращая потери азота в соответствии с массовым балансом «вход — выход». Снижение уровня неорганического азота в почве может уменьшить потери в виде $\text{NO}_3^-$ , $\text{NO}_x$ , $\text{N}_2\text{O}$ и $\text{N}_2$ . Многолетние растения с более развитой корневой системой могут дать сопутствующие выгоды по азоту и воде, снижая выщелачивание $\text{NO}_3^-$ .
Управление ландшафтом — мера 2	Использование промежуточных культур в севообороте на пахотных землях	Принцип 7 Принцип 8 Принцип 16 Принцип 20	Удаление азота с помощью покровных культур позволяет снизить потери азота в критические периоды. Обеспечение соответствия количеств вводимого азота потребностям сельскохозяйственных культур позволяет снизить все потери азота. Промежуточные культуры выводят азот из почвы и, следовательно, могут снизить его потери в форме $\text{NO}_3^-$ , $\text{NO}_x$ , $\text{N}_2\text{O}$ и $\text{N}_2$ . Совместная оптимизация азотного и водного циклов позволяет уменьшить выщелачивание $\text{NO}_3^-$ .
Управление ландшафтом — мера 3	Включение растений с $\text{N}_2$ -фиксирующими свойствами в севообороты (в том числе уплотнение культур)	Принцип 8 Принцип 15 Принцип 16 contra Принцип 16	Обеспечение соответствия количеств вводимого азота потребностям сельскохозяйственных культур позволяет снизить все потери азота. Сведение к минимуму контакта $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом за счет обеспечения медленной биологической фиксации азота. Замедление денитрификации уменьшает другие потери азота за счет низкой скорости действия азотного удобрения. Запашка азотсодержащих сидератов бобовых в системе севооборота может привести к потерям азота в виде $\text{NO}_3^-$ , $\text{NO}_x$ , $\text{N}_2\text{O}$ и $\text{N}_2$ .

<i>Меры</i>		<i>Соответствующие принципы, лежащие в основе перечисленных мер</i>	
<i>Номер меры</i>	<i>Описание мер</i>	<i>Номер принципа</i>	<i>Описание и применение принципов</i>
<i>Кормление, содержание животных, управление навозом и восстановлением питательных веществ</i>			
Управление ландшафтом — мера 4	Внедрение агролесоводства и использование деревьев в ландшафте	Принцип 7 Принцип 11 Принцип 20	Многолетние культуры позволяют запасать больше углерода и азота в биомассе и почве, сокращая потери азота в соответствии с массовым балансом «вход — выход». Структура элементов ландшафта влияет на способность запасаания и буферизации потоков азота. Многолетние растения с более развитой корневой системой могут дать сопутствующие выгоды по азоту и воде, снижая выщелачивание $\text{NO}_3^-$ .
Управление ландшафтом — мера 5	Искусственные водно-болотные угодья	Принцип 11 Принцип 19 contra Принцип 15 contra Принцип 16 Принцип 4	Специально спроектированные экосистемы могут действовать в качестве буфера азотного загрязнения. Побочные выгоды от повторного использования других питательных веществ. Контактное взаимодействие $\text{NH}_4^+$ -содержащих ресурсов с воздухом увеличивает выбросы $\text{NH}_3$ . Увеличение рисков денитрификации других потерь азота и снижение ЭИА. Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики.
Управление ландшафтом — мера 6	Высадка болотных культур в прибрежных районах или в искусственных водно-болотных массивах	Принцип 11 contra Принцип 15 contra Принцип 16 Принцип 4	Структура элементов ландшафта влияет на способность запасаания и буферизации потоков азота. Контактное взаимодействие с воздухом увеличивает выбросы $\text{NH}_3$ . Увеличение рисков денитрификации других потерь азота и снижение ЭИА. Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики.
Управление ландшафтом — мера 7	Использование органических слоев для содействия удалению нитратов	contra Принцип 16 Принцип 4	Искусственное стимулирование процесса денитрификации снижает количество $\text{NO}_3^-$ в водных потоках, одновременно увеличивая другие потери азота, такие как $\text{N}_2\text{O}$ и $\text{N}_2$ , а также снижает ЭИА. Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики.
Управление ландшафтом — мера 8	Управление дренажом	Принцип 16 Принцип 4	Снижает потери, связанные с денитрификацией, за счет сокращения времени пребывания почвенной воды, однако, соответственно, вероятно, увеличивает потери $\text{NO}_3^-$ с водными потоками. Необходимость компромиссов требует определения приоритетов политики.
Управление ландшафтом — мера 9	Стимулирование удаления $\text{N}_r$ из прибрежных вод	Принцип 7	Выращивание и заготовка биомассы в прибрежных водах позволяет увеличить количество удаляемого азота, а также уменьшает загрязнение азотом прибрежных районов в соответствии с массовым балансом.
Управление ландшафтом — мера 10	Посадка деревьев в целях облесения и создания лесозащитных полос в ландшафте	Принцип 11 Принцип 20	Структура элементов ландшафта влияет на способность запасаания и буферизации потоков азота. Многолетние растения с более развитой корневой системы могут дать сопутствующие выгоды в

Меры		Соответствующие принципы, лежащие в основе перечисленных мер	
Номер меры	Описание мер	Номер принципа	Описание и применение принципов
<i>Кормление, содержание животных, управлением навозом и восстановлением питательных веществ</i>			
Управление ландшафтом — мера 11	Резервные и другие неудобряемые луговые угодья	Принцип 11	плане управления азотным и водным циклами, снижая выщелачивание NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> . Структура элементов ландшафта влияет на способность запасаения и буферизации потоков азота. Неудобряемые земли могут служить буфером для азотных соединений, смываемых в воду, и физически разделять выбросы и уязвимые экосистемы.
Управление ландшафтом — мера 12	Защитные пояса вокруг крупных точечных источников	Принцип 11	Структура элементов ландшафта влияет на способность запасаения и буферизации потоков азота. Пояса лесопосадок вокруг точечных источников выбросов NH <sub>3</sub> обеспечивают улавливание и рассеивание NH <sub>3</sub> и частиц, действуя в качестве буферов для защиты близлежащих чувствительных экосистем.
Управление ландшафтом — мера 13	Экологически рациональное размещение животноводческих объектов	Принцип 11 Принцип 16	Структура элементов ландшафта влияет на способность запасаения и буферизации потоков азота. Использует «умное» размещение для максимального увеличения возможностей ландшафтной буферизации. Предотвращение резких скачков поступления азота в полуестественные системы помогает избежать образования избытков на местном уровне, снижая потери азота.
Управление ландшафтом — мера 14	Цифровое планирование землепользования на основе оценки пригодности	Принципы 11, 12, 14, 16 и 20	Оптимизация растениеводства и животноводства по всем параметрам, включая структуру и уязвимость ландшафта, в том числе взаимодействие с водными потоками.
Управление ландшафтом — мера 15	Переход к смешанному сельскому хозяйству, включая системы свободновыгульного содержания	Принципы 5, 7 и 8	Смешанные системы сельского хозяйства позволяют повторно использовать ресурсы навоза на месте в системах земледелия, что снижает поступление азота в соответствии с массовым балансом с широкой возможностью снижения потерь азота.
Управление ландшафтом — мера 16	Выбор технических решений для снижения потерь N <sub>r</sub> применительно к ландшафтному уровню	Принцип 4 Принцип 11	На основе согласованных политических приоритетов политики некоторые районы определяются как более уязвимые и требующие особой защиты, поэтому вблизи таких зон применяются более масштабные технические меры.

*Сокращения:* ЭИА — эффективность использования азота, которая может определяться в широком смысле, как в масштабе отраслей растениеводства и животноводства, так и всей агропищевой цепочки и всей экономики в целом.

64. Приоритетные соображения для разработчиков политики в отношении комплексного управления азотом в целях сведения к минимуму загрязнения включают:

а) комплексное планирование азота на уровне хозяйства, отрасли и региона (включая учет тренда к концентрации интенсивных животноводческих и растениеводческих хозяйств, зачастую вблизи крупных городов) в свете того, что здоровые пищевые продукты производятся при низкой нагрузке на окружающую среду;

b) сведение к минимуму внесения питательных веществ в зонах с высоким уровнем риска (водные и чувствительные к азотным отложениям среды обитания, водосборные бассейны, подверженные высокому риску) с учетом специфических региональных требований и условий;

c) использование в сельском хозяйстве питательных веществ, полученных за счет переработки органических отходов (это может потребовать планирования на региональном уровне и надлежащего контроля качества применяемых материалов);

d) отбор экономически эффективных мер сокращения выбросов для внедрения фермерами;

e) предоставление службам поддержки сельхозпроизводителей и самим фермерам, по мере необходимости, технических консультаций, рекомендаций и возможностей обучения по вопросам, касающимся использования азота и управления им.

65. Приоритетные соображения для разработчиков политики в отношении мер в области землепользования и ландшафтов в целях комплексного управления азотом включают в себя:

a) организацию пилотных проектов и демонстрации устойчивого землепользования и управления ландшафтом, чтобы показать, как эти подходы могут использовать азотный цикл для максимального повышения общей устойчивости при снижении воздействия на окружающую среду;

b) подготовку научных данных, сценариев и инструментов для демонстрации эффективности мер по снижению ряда неблагоприятных воздействий азота на чувствительные ландшафты, включая анализ затрат и выгод;

c) демонстрацию того, как различные схемы землепользования и управления ландшафтом способствуют развитию производственных систем, которые более устойчивы к изменению климата и позволяют оказывать более разнообразные услуги, в то же время снижая воздействие  $N_f$  на окружающую среду;

d) анализ взаимосвязи выгоды для азота с другими вопросами; к примеру, лесные массивы в ландшафтах выполняют ряд функций, таких как повышение способности удержания влаги в ландшафтных элементах для снижения вероятности подтопления, а также обеспечение сред обитания для диких животных и укрытия для скота, в дополнение к своим преимуществам в качестве инструментов управления азотом.

## **F. Приоритеты для практических работников сельского хозяйства**

66. Применительно к содержанию животных и хранению навоза определены следующие приоритеты:

a) содержание азота в рационе животных должно как можно ближе соответствовать потребностям животных, чтобы предупредить избыточное поступление азота уже на уровне кормления;

b) следует поддерживать прохладную температуру и чистоту в животноводческих помещениях, а также регулярно вывозить навоз на крытое наружное хранилище;

c) хранить навоз следует в крытом хранилище, и, при возможности, осуществлять обработку навоза для снижения выбросов (например, анаэробное сбраживание, сепарация, подкисление);

d) следует обеспечить многократное использование питательных веществ навоза в качестве ценного удобрения в растениеводстве.

67. Для сельхозпроизводителей основными целями реализации мер по снижению выбросов являются повышение эффективности использования азота, содержащегося во вносимых в почву удобрениях или навозе, экономия затрат на азотные удобрения, а также снижение загрязнения воздуха, воды и почвы. Таким образом, для фермеров

основными полевыми мерами по повышению эффективности использования азота являются:

- a) комплексное планирование управления азотом в масштабах хозяйства с учетом всех доступных источников азота;
- b) прецизионное управление питательными веществами: надлежащее количество, время и место внесения азота в соответствии с местными условиями;
- c) использование соответствующего продукта и формы удобрения (включая, при необходимости, ингибиторы) в соответствующем контексте;
- d) использование технологий внесения навозной жижи с низким уровнем выбросов (с учетом снижения потерь азота в планах, касающихся питательных веществ);
- e) быстрая заделка в почву органических добавок, богатых аммиаком.

68. Основные меры в области землепользования и управления ландшафтами, которые реализуются на практике, можно разделить на две группы: меры, связанные с географически обусловленным изменением в землепользовании, и меры, связанные с адаптированными к географическим условиям методами управления на уровне ландшафта/региона.

69. Основные меры по изменению землепользования включают:

- a) резервные/лугопастбищные угодья (без использования удобрений);
- b) обустройство прибрежных буферных полос или буферных полос для сохранения биоразнообразия вокруг или внутри полей (отличие заключается в близости к водоемам):
- c) создание лесозащитных полос и облесение;
- d) изменение севооборота/переход на многолетние культуры (например, постоянные лугопастбищные угодья);
- e) агролесоводство;
- f) восстановление водно-болотных угодий и водотоков и/или создание мини водно-болотных массивов.

70. Основные решения применительно к географически ориентированным мерам в масштабе ландшафта и региона включают:

- a) обработку и сохранение почвы (например, отказ от вспашки органических почв);
- b) дренажные меры и регулируемый дренаж;
- c) управление лугопастбищными угодьями;
- d) выбор места для животноводческих хозяйств;
- e) пространственное перераспределение навоза;
- f) фертигацию и установку надлежащих систем орошения для засушливых посевных площадей;
- g) выбор мест размещения биогазовых установок и биоперерабатывающих предприятий для перераспределения биомассы.

71. Следует отметить, что фермеры все шире применяют так называемые «методы регенеративного сельского хозяйства», при этом некоторые приемы могут сокращать различные потери азота, включая отказ от вспашки, «органическое земледелие» (отказ от использования синтетических неорганических удобрений и упор на биологической фиксации азота) и деятельность, направленную на увеличение секвестрации углерода, и т. д. Как и в случае других агроподходов, такие системы дают возможность вырабатывать специальные «пакеты мер» для содействия устойчивому управлению азотом. Такие системы требуют дополнительного изучения с точки зрения количественной оценки их влияния на потери азота во всех формах, включая выбросы  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$  и выщелачивание  $\text{NO}_3^-$  и другие формы  $\text{N}_r$ .

### III. Принципы комплексного устойчивого управления азотом

#### A. Введение и справочная информация

72. Азот приносит существенную пользу обществу, особенно в связи с тем, что он стимулирует повышение урожайности. Вместе с тем потери азота (N) сопряжены с многогранными проблемами, затрагивающими здоровье человека и окружающую среду. Эти связанные с азотом проблемы относятся ко многим научным дисциплинам и ко многим областям политики и регулирования. Это означает, что для оптимального использования азота требуется комплексный подход, позволяющий избежать компромиссов и извлекать многократные выгоды для общества и окружающей среды (Oenema and others, 2011b). Поскольку сельское хозяйство является сектором, где в целях получения финансовой выгоды осуществляется намеренное введение азота для повышения продуктивности и качества сельскохозяйственных растений, этот сектор является наиболее ярким примером того, почему необходим комплексный подход.

73. Управление азотом в сельском хозяйстве преследует двоякую цель: снизить потери азота в интересах защиты здоровья человека и окружающей среды и оптимизировать положительные эффекты N, связанные с производством продовольствия. Прилагательные «комплексный» и «устойчивый» в названии этой главы означают, что управление азотом должно носить сбалансированный и долгосрочный характер в интересах нынешнего и будущих поколений (например, не наносить вред окружающей среде, быть социально приемлемым и экономически выгодным). Необходимо полностью устранить негативные последствия потерь азота для здоровья человека, экосистемных услуг, биоразнообразия, водных ресурсов и климата. Комплексное устойчивое управление азотом способствует достижению большинства целей в области устойчивого развития. В частности, комплексное устойчивое управление азотом прямо или косвенно способствует достижению ЦУР 1 (ликвидация нищеты), ЦУР 2 (ликвидация голода), ЦУР 3 (хорошее здоровье и благополучие), ЦУР 6 (чистая вода и санитария), ЦУР 12 (ответственное потребление и производство), ЦУР 13 (борьба с изменением климата), ЦУР 14 (сохранение морских экосистем) и ЦУР 15 (сохранение экосистем суши). В настоящее время широко распространенные данные о неблагоприятном воздействии азотного загрязнения на воздух, климат, земельные и водные ресурсы (Galloway and others, 2008; Fowler and others, 2013; Sutton and others, 2011, 2019; Alcamo and others, 2013) свидетельствуют о том, что для сокращения этого воздействия необходимы дальнейшие действия, направленные на повышение эффективности мер по борьбе с азотным загрязнением и смягчению его последствий в сельском хозяйстве (European Environment Agency, 2015). Комплексное устойчивое управление азотом является отправной точкой для мобилизации более устойчивых и скоординированных действий с учетом принципов агроэкологии, обеспечивая основу для достижения многих целей в области устойчивого развития.

74. Целью настоящей главы является описание принципов комплексного устойчивого управления азотом в сельском хозяйстве. В подразделе 1 ниже рассматриваются пять важных аспектов, которые необходимо учитывать в рамках любой системы управления азотом для обеспечения ее эффективности. Чтобы ознакомить читателя с характером цикла азота, связанного с ведением сельского хозяйства, в подразделе 2 описываются ключевые положения, касающиеся круговорота азота в биосфере. В подразделе 3 обсуждаются принципы управления азотом в сельском хозяйстве. Далее в разделе 1.5 представлены некоторые общие инструменты для комплексного управления азотом. В последующих главах рассматриваются возможные меры по снижению потерь азота и повышению эффективности его использования в сельском хозяйстве.

## **В. Аспекты комплексного устойчивого управления азотом**

75. Многие страны предпринимают усилия с целью разработки более комплексных и эффективных подходов к снижению потерь азота в сельском хозяйстве. Однако нынешние экологические стратегии практически не предусматривают каких-либо мер в области управления азотом. В данном случае интеграция определяется как процесс организованного объединения отдельных элементов и аспектов таким образом, направленный на обеспечение увязки между собой и слаженного функционирования составных частей. Можно выделить пять важных аспектов интеграции в области управления азотом:

- a) причинно-следственные связи;
- b) пространственно-временная интеграция всех форм и источников азота;
- c) множественность питательных веществ и загрязнителей;
- d) множественность типов заинтересованных сторон, участия и интеграции; и
- e) региональная интеграция. Эти аспекты определены на основе описания в более ранних работах (Oenema and others, 2011b) и подробно рассматриваются ниже.

### **1. Причинно-следственные связи**

76. Этот аспект лежит в основе всех нынешних стратегий в отношении азота, поскольку воздействие вызванного выбросами азота загрязнения на здоровье человека и окружающую среду используется для обоснования и поддержки мер политики, направленных на сокращение таких выбросов.

77. Причинно-следственный аспект («источник — воздействие») связан также с концепцией ДНСВР (см. European Environment Agency, 1995). Эта концепция дает представление о причинно-следственных и экономико-экологических взаимосвязях, а также о возможных мерах реагирования со стороны общества и правительств.

### **2. Пространственно-временная интеграция всех форм и источников азота**

78. Пространственно-временная интеграция при управлении азотом предполагает сведение в единый план управления всех форм азота, азотных источников и выбросов в пределах определенного района и в определенных временных рамках. В какой-то степени интеграция этого вида предусмотрена в Гётеборгском протоколе: в нем, например, охватывается большинство источников  $\text{NO}_x$  и  $\text{NH}_3$ , однако выбросы  $\text{NO}_x$  из сельскохозяйственных почв, (полу-)естественные источники  $\text{NO}_x$  и  $\text{NH}_3$ , выбросы  $\text{N}_2\text{O}$  в атмосферу и поступления азота в водоемы в результате выщелачивания пока не включены в оценку соблюдения обязательств по сокращению выбросов. Аналогичным образом, в Директиве Европейского союза о нитратах предусмотрено, что все источники азота в сельском хозяйстве должны рассматриваться на предмет сокращения поступления  $\text{NO}_3$  в водоемы в процессе выщелачивания, но при этом атмосферные выбросы  $\text{NH}_3$  и  $\text{N}_2\text{O}$  напрямую не рассматриваются. Согласно директивам Европейского союза о защите птиц<sup>8</sup> и о сохранении мест обитания<sup>9</sup>, все формы азота, азотные источники и выбросы необходимо учитывать в той мере, в какой они являются факторами, влияющими на экологические требования, связанные с охраняемыми местами обитания и видами. Ни в одном из этих директивных документов не рассматривается напрямую вопрос о выбросах газообразного  $\text{N}_2$  в результате денитрификации. Хотя выбросы газообразного  $\text{N}_2$  напрямую не вызывают негативного воздействия на окружающую среду, они могут рассматриваться как потеря энергии, используемой для производства  $\text{N}_r$ , или же как потеря ресурсов

<sup>8</sup> Директива 2009/147/ЕС 2284 Европейского парламента и Совета Европейского союза от 30 ноября 2009 года о сохранении диких птиц, *Official Journal of the European Union*, L 20 (2010), сс. 7–25.

<sup>9</sup> Директива Совета 92/43/ЕЕС от 21 мая 1992 года о сохранении естественных мест обитания, а также дикой фауны и флоры, *Official Journal of the European Communities*, L 206 (1992), сс. 7–50.

полезного азота, что указывает на необходимость сокращения выбросов N<sub>2</sub>. Эти вопросы были подняты в недавней резолюции 4/14 Ассамблеи Организации Объединенных Наций по окружающей среде об устойчивом регулировании азота (см. UNEP/EA.4/Res.14) и в последовавшей за ней Декларации Коломбо (UNEP, 2019).

79. С концептуальной точки зрения модель азотного каскада (Galloway and others, 2003; 2004) является хорошим примером пространственной интеграции, осуществляемой в различных временных масштабах, однако эту модель еще только предстоит приспособить для использования в управлении. Азотный каскад представляет собой концептуальную модель для анализа причинно-следственного аспекта интеграции, особенно в тех случаях, когда также проводится анализ затрат и выгод.

### 3. Большое количество питательных веществ и загрязняющих веществ

80. Есть две основные причины для того, чтобы включить управление азотом с процессами управления другими отдельными элементами (соединениями) в экологическую политику, а именно:

а) другие элементы (соединения) могут вызывать схожие последствия для окружающей среды; и

б) взаимодействие между различными формами азота и этими элементами и соединениями может достигать значительных масштабов.

81. С точки зрения специалиста-практика, одновременное управление азотом и другими отдельными элементами может быть связано с определенными преимуществами. Это относится, например, к азоту и фосфору (P) в сельском хозяйстве и очистке сточных вод, а также к NO<sub>x</sub> и SO<sub>2</sub> и PM из источников, в которых происходит сжигание.

82. Такой вид интеграции частично предусмотрен Гётеборгским протоколом и директивой Европейского союза об установлении верхних предельных значений выбросов на национальном уровне<sup>10</sup>, в которых рассматриваются выбросы в атмосферу NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> и SO<sub>2</sub>, поскольку эти выбросы способствуют формированию довольно похожих экологических явлений (загрязнение воздуха, подкисление, эвтрофикация). Выбросы азота, и фосфора загрязняют поверхностные водоемы и способствуют эвтрофикации и сокращению биоразнообразия; поэтому в директивных документах Европейского союза, направленных на борьбу с эвтрофикацией поверхностных водоемов (например, в Рамочной директиве Европейского союза о водных ресурсах<sup>11</sup>), азот и фосфор рассматриваются вместе. Кроме того, биосферные циклы азота и углерода (C) тесно связаны между собой, и нарушения этих циклов способствуют изменениям, касающимся выбросов парниковых газов CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O, которые, как правило, рассматриваются вместе в рамках политики в области изменения климата. Кроме того, в результате воздействия на секвестрацию углерода в биосфере и изменение химического состава атмосферы азот может влиять на выбросы CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> (Butterbach-Bahl, Kiese and Liu, 2011a). Поскольку с азотом связаны многочисленные последствия, касающиеся всех этих явлений, упор на управление азотом может служить основой для того, чтобы объединить между собой многочисленные последствия и эффекты. Увязывание между собой различных форм азота (N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и т. д.) является следующим осуществимым шагом в сторону интеграции. Кроме того, оно позволяет сформировать базу, чтобы продемонстрировать многочисленные связи между циклами N, C, P, серы (S), калия (K), кремния (Si) и многих других элементов, включая микроэлементы.

<sup>10</sup> Директива (ЕС) 2016/2284 Европейского парламента и Совета Европейского союза от 14 декабря 2016 года о сокращении национальных выбросов некоторых загрязнителей атмосферы, вносящая изменения в Директиву 2003/35/ЕС и отменяющая Директиву 2001/81/ЕС, *Official Journal of the European Union*, L 344 (2016), сс. 1–31.

<sup>11</sup> Директива 2000/60/ЕС Европейского парламента и Совета Европейского союза от 23 октября 2000 года, устанавливающая основы для деятельности Сообщества в области водной политики, *Official Journal of the European Communities*, L 327 (2000), сс. 1–72.

#### 4. Большое количество типов заинтересованных сторон, вовлечение и интеграции

83. Любая политика управления азотом, независимо от того, является она комплексной или нет, должна быть:

- a) актуальной с политической точки зрения (например, затрагивать ключевые проблемы);
- b) научно и аналитически обоснованной;
- c) затратноэффективной (в частности, затраты должны быть пропорциональны поставленной цели); и
- d) справедливой по отношению к пользователям.

84. В случае нарушения одного или нескольких из этих принципов политика управления будет менее эффективной либо из-за задержки внедрения, либо из-за низкого уровня осуществления и эффективности, либо из-за сочетания этих факторов. Для успешного применения вышеупомянутых принципов требуется коммуникация между субъектами, занимающимися вопросами политики, науки и практики. Надежность и полезность взаимодействия между наукой, политикой и практикой в значительной степени определяются работой по «делимитации», осуществляемой на стыке этих трех сфер на ранних этапах налаживания коммуникации между ними (Tuinstra, Hordijk and Kroeze, 2006; Clark and others, 2016). Под работой по «делимитации» в данном случае понимается деятельность, направленная на сохранение или устранение границ между наукой, политикой и практикой в целях формирования и изменения механизмов взаимодействия между наукой, политикой и практикой.

85. Чрезвычайно важную роль играет взаимодействие с заинтересованными сторонами (например, производителями удобрений, производителями продуктов питания, предприятиями перерабатывающей промышленности и розничной торговли и широкой общественностью). Мнения таких заинтересованных сторон должны приниматься во внимание как можно раньше на этапе разработки планов и мер по управлению азотом, в особенности в случае консультантов и специалистов-практиков, которые в конечном счете должны будут внедрять меры по управлению. Для учета мнений заинтересованных сторон можно прибегать к целому ряду процессов, варьирующих от процедур общественных консультаций и слушаний до подходов, основанных на широком участии, и обучения. Хорошим примером последнего подхода является Рамочная директива Европейского союза о водных ресурсах, согласно которой для разработки планов управления речными бассейнами требуется полноценное участие заинтересованных сторон.

86. Учет мнений заинтересованных сторон не ведет к более быстрому принятию решений; напротив, процесс принятия решений часто занимает больше времени. Процедуры общественных консультаций могут быть времяземкими, хотя эффективную поддержку в процессе принятия решений могут оказать такие методы, как принятие решения на основе множества различных критериев. Этот подход направлен на поиск выхода из конфликтных ситуаций или поиск решений в рамках транспарентного процесса. Учет мнений заинтересованных сторон может в конечном итоге повысить уровень принятия стратегий управления и тем самым способствовать их практической реализации.

#### 5. Региональная интеграция

87. В качестве пятого аспекта интеграции здесь рассматривается региональная интеграция или «интеграция в более крупных пространственных масштабах». Цель региональной интеграции заключается в расширении сотрудничества между регионами и ландшафтами. Она касается интеграции рынков и согласования между регионами государственной политики и деятельности государственных учреждений посредством заключения политических соглашений, пактов и договоров (Bull, Hoft and Sutton, 2011). В пользу региональной интеграции говорят, в частности, следующие аргументы:

- a) укрепление рынков;
- b) создание «равных условий» для осуществления политических мер;

- c) трансграничный характер загрязнения окружающей среды;
- d) анализ косвенных последствий загрязнения; и
- e) повышение эффективности и действенности региональной политики и связанных с ней мер по управлению.

88. С точки зрения управления азотом региональная интеграция связана, например, с согласованием и стандартизацией экологической политики по всему Европейскому союзу и политики по борьбе с загрязнением воздуха по всему региону ЕЭК ООН (Bull, Hoft and Sutton, 2011). Планы управления речными или водосборными бассейнами, разработанные в соответствии с Рамочной директивой Европейского союза о водных ресурсах, также представляют собой одну из форм региональной интеграции. При этом аспекты количества и качества воды в рамках четко определенного водосборного бассейна рассматриваются на основе комплексного подхода. Рамочная директива Европейского союза о морской стратегии<sup>12</sup> также направлена на поощрение интеграции на региональном уровне посредством обеспечения последовательности определения хорошего экологического статуса и целевых показателей в соответствии с ее пятым качественным дескриптором (эвтрофикация) (см. приложение I к Рамочной директиве о морской стратегии) и координацию программ осуществления мер, поддерживаемых региональными морскими конвенциями, такими как Хельсинкская комиссия по защите морской среды Балтийского моря (ХЕЛКОМ) и Конвенция о защите морской среды Северо-Восточной Атлантики.

89. Наблюдаемая в последние десятилетия тенденция к региональной интеграции вовсе не обязательно означает, что действия по управлению на местном уровне являются менее эффективными и/или результативными. Местные действия могут разрабатываться с большим учетом специфики конкретной местности и, как следствие, зачастую оказываются более эффективными, нежели общие меры. Это относится к домашним хозяйствам, фермерским хозяйствам и предприятиям, особенно в тех случаях, когда субъекты могут повлиять на выбор мер. Кроме того, мотивация к тому, чтобы внести вклад в защиту местной окружающей среды и охрану местной природы, может быть выше, чем мотивация к тому, чтобы внести вклад в улучшение состояния окружающей среды в целом.

## **С. Ключевые положения, касающиеся круговорота азота**

90. В этом разделе описываются ключевые положения, касающиеся круговорота азота в биосфере, лежащие в основе азотного цикла, связанного с ведением сельского хозяйства. Эти ключевые положения служат отправной точкой для рассмотрения принципов устойчивого управления азотом, описанных далее в настоящем документе. В данном случае под «принципами» понимаются «фундаментальные истины» и/или «устоявшиеся научные и эмпирические знания», с которыми должны быть знакомы все специалисты-практики, а также специалисты по управлению азотом и лица, ответственные за разработку политики. Ключевые положения, касающиеся круговорота азота, также представляют собой принципы, касающиеся необходимой информации.

91. Ниже перечислены десять ключевых положений, связанных с круговоротом азота. Эти ключевые положения являются звеном, связывающим между собой данный раздел и следующий раздел, в котором рассматриваются принципы комплексного управления азотом в сельском хозяйстве:

### **Ключевое положение 1. Азот необходим для жизни.**

92. Азот является одним из ключевых элементов, входящих в состав хлорофилла растений, гема крови животных, а также аминокислот (белков), нуклеиновых кислот и

<sup>12</sup> Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза 2008/56/ЕС от 17 июня 2008 года, устанавливающая рамочное законодательство Сообщества в области морской природной политики, *Official Journal of the European Union*, L 164 (2008), сс. 19–40.

аденозинтрифосфата всех живых организмов, в том числе бактерий растений, животных и человека. Круговорот азота в естественных условиях характеризуется тем, что доступность этого элемента в разных формах для живых организмов является ограниченной. Поэтому естественный азотный цикл представляет собой практически закрытую систему, в которой осуществляются эффективная переработка и повторное использование азота. В силу этой ограниченной доступности азот зачастую является ограничивающим фактором для роста растений. Борьба между видами растений за ограниченные ресурсы доступного азота (а также других элементов, играющих роль ограничивающего фактора для роста) является одним из основных факторов биологического разнообразия в природных системах.

93. В сельскохозяйственных системах за счет добавления азота, содержащегося в животном навозе или удобрениях, удается добиться значительного повышения урожайности, особенно если добавление азота сбалансировано добавлением других ключевых питательных веществ. Согласно оценкам, в настоящее время существование примерно половины людей на планете оказывается возможным благодаря повышенному использованию азотных удобрений, что свидетельствует о колоссальной роли азота, которую он сыграл в удовлетворении потребностей людей в продовольствии, обеспечив таким образом возможность быстрого увеличения численности мирового населения (Erismann and others, 2008; Sutton and others, 2013). Согласно прогнозам, чтобы обеспечить нынешний рацион питания в условиях роста численности населения, особенно в Африке и некоторых частях Азии, в течение следующих нескольких десятилетий понадобится еще больше азота (Godfray and others, 2010).

**Ключевое положение 2. Избыток азота сопряжен с целым рядом негативных последствий, особенно для здоровья человека, экосистемных услуг, биоразнообразия, водных ресурсов и изменения климата.**

94. За последнее столетие общее количество азота, поступающего в глобальную биосферу в результате человеческой деятельности, значительно возросло (более чем вдвое) (Galloway and others, 2008), и в настоящее время превысило критические пределы так называемого «безопасного оперативного пространства» для человечества (Steffen and others, 2015). Пагубное воздействие избытка азота на здоровье человека и биоразнообразии наиболее заметно в регионах с интенсивным сельским хозяйством, особенно интенсивным животноводством, в городах, а также на крупных реках и в прибрежных районах. Азот оказывает как разогревающее, так и охлаждающее воздействие на климат (Butterbach-Bahl and others, 2011b), а также способствует истощению озонового слоя стратосферы (Alcamo and others, 2013). Негативные последствия избытка азота в окружающей среде служат обоснованием для мер политики по снижению выбросов азота.

**Ключевое положение 3. Азот существует в нескольких формах.**

95. Азот переходит из одной формы в другую благодаря биохимическим процессам, в которых участвуют микроорганизмы, растения и/или животные, а также посредством химических процессов, которым способствуют повышенные температуры и давление, атмосферный свет и возможные катализаторы (Smil, 2004; Hatfield and Follett, 2008; Schlesinger and Bernhardt, 2013).

96. Это имеет ряд последствий: большинство форм азота являются «активными», поскольку они легко трансформируются в биосфере в другие формы в ходе биологических, фотохимических и радиационных процессов. Химически активные соединения азота ( $N_r$ ) включают в себя:

а) неорганические восстановленные формы, такие как аммиак ( $NH_3$ ) и аммоний ( $NH_4^+$ ), совместно обозначаемые ( $NH_x$ );

б) неорганические окисленные формы (например,  $NO_x$ , азотная кислота ( $HNO_3$ ), азотистая кислота ( $HONO$ ), закись азота ( $N_2O$ ), нитрит ( $NO_2^-$ ) и нитрат ( $NO_3^-$ );

с) органические восстановленные формы, такие как мочевина, амины, белки и нуклеиновые кислоты.

97. Восстановленные формы — это доноры энергии, доноры протонов и акцепторы электронов; энергия поглощается из промышленных процессов и биологической фиксации азота, что означает, что  $\text{NH}_x$  является важным ресурсом. Окисленные формы являются акцепторами протонов и донорами электронов. Одна восстановленная форма, диазот ( $\text{N}_2$ ), не является активной (химически она чрезвычайно стабильна), поскольку для того, чтобы разорвать связь между двумя атомами N, требуется много энергии;

98. **Азот является «вдвойне мобильным»**, потому что он легко транспортируется в окружающей среде как в воздухе, так и в воде. Все газообразные и жидкие формы  $\text{N}_r$  в достаточно высоких концентрациях токсичны для человека и животных (и растений). Уровни токсичных концентраций сильно различаются как между формами, так и между организмами:

а) азот переносится по воздуху в виде газов, таких как диазот ( $\text{N}_2$ ), закись азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ),  $\text{NO}_x$  (включая  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ ), азотная кислота ( $\text{HNO}_3$ ), азотистая кислота ( $\text{HONO}$ ) и аммиак ( $\text{NH}_3$ ), амины и другие летучие органические азотсодержащие соединения ( $\text{VON}$ ), а также в виде аэрозолей, включая дисперсные частицы  $\text{PM}$ , образующиеся, в частности, из нитратов ( $\text{NO}_3^-$ ), аммония ( $\text{NH}_4^+$ ) и азота органического происхождения в виде частиц ( $\text{PON}$ );

б) азот переносится растворенным в воде в виде нитратов ( $\text{NO}_3^-$ ), аммония ( $\text{NH}_4^+$ ), мочевины ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ), растворенного органического азота ( $\text{DON}$ ) и закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ), а также переносится во взвешенном состоянии в воде в виде твердых частиц органического азота ( $\text{PON}$ ).

**Ключевое положение 4. Один и тот же атом азота может приводить к различным последствиям для атмосферы, наземных экосистем, пресноводных и морских систем, а также для здоровья человека.**

99. Это явление получило название «N-каскад», который определяется как последовательный перенос  $\text{N}_r$  через системы окружающей среды и приводит к изменениям окружающей среды по мере того, как  $\text{N}_r$  проходит через каждую систему или временно хранится внутри каждой системы (Galloway and others, 2003).

**Ключевое положение 5. Азот мигрирует из почвы в растения и животных, в воздух и водные объекты и обратно, из одного региона в другой, в результате естественных факторов и антропогенных процессов, которые необходимо понимать для эффективного управления азотом.**

100. Естественными факторами являются:

а) солнечное излучение, которое является главным фактором процесса фотосинтеза, гидрологического цикла, ветра и перепадов температур, потока массы в воздухе и воде;

б) гравитация, определяющая движение пород и эрозию;

с) тектонические процессы Земли, обуславливающие сейсмическую и вулканическую активность;

д) молнии и биологическая фиксация азота, в результате которых образуются активный азот;

е) турбулентная диффузия, молекулярная диффузия и броуновское движение, которые обуславливают дисперсию газа и частиц.

101. Скорость циклов и время пребывания в воздухе, воде и почве сильно различаются для разных форм азота. В атмосфере такие газы, как  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{HONO}$ , имеют короткое время пребывания в воздухе (дни, недели), в то время как  $\text{N}_2\text{O}$  остается в атмосфере более века, а  $\text{N}_2$  — еще дольше. Время пребывания связано с реакционной способностью форм азота. В водных системах время пребывания азота

может варьироваться от нескольких лет до многих веков в зависимости от характера водоносного горизонта и запасов подземных вод.

**Ключевое положение 6. Деятельность человека сильно изменила естественный азотный цикл и привела к тому, что объем потерь в нем возрос.**

102. Среди наиболее глубоких изменений, вызванных деятельностью человека, следует назвать изменения в землепользовании, урбанизацию, синтез неорганических азотных удобрений и глобализацию продовольственных систем (Vitousek and others, 1997; Fowler and others, 2013). Урбанизация и глобализация продовольственных систем привели к увеличению объема перевозок продовольствия и кормов, производимых в сельских районах (где происходит азотное истощение), а также в районы потребления продуктов питания и кормов, особенно в города и районы содержания домашнего скота (где происходит региональное азотное обогащение). Региональное пространственное разделение производства и потребления продуктов питания и кормов также является одним из ключевых факторов снижения эффективности использования азота в масштабах всей продовольственной системы в мире за последние десятилетия (Lassaletta and others, 2014; Oita and others, 2016).

**Ключевое положение 7. Характер и антропогенные изменения азотного цикла ставят под угрозу как переход к экономике замкнутого цикла, так и комплексное устойчивое управление азотом; лица, ответственные за разработку политики и принятие решений в обеих областях, могут обмениваться опытом.**

103. Многие принципы «экономики замкнутого цикла» и «систем замкнутого цикла» также применимы к принципам комплексного устойчивого управления азотом, в том числе и к принципам:

- a) сокращение потерь;
- b) сокращение, повторное использование и переработка отходов;
- c) перераспределение и сокращение вводимых ресурсов;
- d) пересмотр уровней потребления белков (например, минимизация избытка белка); и
- e) внесение изменений в системы в целях снижения потерь и повышения устойчивости.

104. Концепция «экономики замкнутого цикла по азоту» (Sutton and others, 2019) и циркулярности в целом берет свое начало в промышленной экологии (Jurgilevich and others, 2016), задача которой состоит в сокращении потребления ресурсов и выбросов в окружающую среду путем замыкания контура обращения материалов и веществ, включая азот и другие питательные вещества. Повышение степени замкнутости в производстве продуктов питания требует переосмысления экономического роста, рациона питания людей, сельскохозяйственной политики и правил, касающихся удобрений и пищевых отходов (De Boer and van Ittersum, 2018).

**Ключевое положение 8. Большая часть азота, содержащегося в растениях, поглощается из почвы корневой системой в виде нитрата ( $\text{NO}_3^-$ ) или аммония ( $\text{NH}_4^+$ ), что указывает на то, что  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NH}_4^+$  должны находиться в непосредственной близости корневой зоны растений и быть доступны в нужное время, чтобы быть эффективными для роста растений.**

105. Способность усваивать азот зависит от потребности растения в азоте, длины, плотности и распределения корней, а также концентрации  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NH}_4^+$  в почвенном растворе. Потребность растения в азоте зависит от типа и сорта культуры, а также климата. Скорость усвоения азота растениями обычно определяется уравнением Михаэлиса-Ментена. Таким образом, максимальная скорость достигается при насыщающей концентрации субстрата ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), при этом излишки азота не используются и могут быть потеряны как загрязнение (в соответствии с законом убывающего плодородия почвы). Потребность растения в азоте и поступление азота через почву зависят от почвенных и погодных условий и технологии. Основными источниками  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NH}_4^+$  в почве являются:

- a) минерализация органически связанного азота в почве;
- b) поступления через атмосферное осаждение;
- c) поступления через навоз, компост и отходы животноводства; и
- d) поступления из неорганических азотных удобрений (Marschner, 2012).

106. Однако часть азота (например, газообразные формы  $\text{NH}_3$  и  $\text{NO}_2$ , поступающие в результате атмосферного осаждения) может поглощаться непосредственно листьями растений (Sutton, Schjørring and Wyers, 1995; Sparks, 2009). В неудобряемых агроэкосистемах, лесах и естественных средах обитания микоризы (почвенные грибы, живущие в сочетании с растениями) могут играть важную роль в доставке питательных веществ к корням растений. Высокий уровень внешнего поступления азота может повлиять на производительность таких микоризных симбиозов.

**Ключевое положение 9. Некоторые виды растений способны преобразовывать инертный молекулярный азот ( $\text{N}_2$ ) из воздуха в химически активные формы (амин, белок) с помощью особых цианобактерий, живущих в корневой системе растений. Эта биологическая фиксация азота является важным источником активного азота в биосфере, в том числе в сельском хозяйстве.**

107. К таким важным культурам относятся семейство бобовых (Fabaceae или Leguminosae) с такими таксонами, как (соя) фасоль, горох, люцерна, клевер и люпин. Они содержат симбиотические бактерии, особенно ризобии, внутри клубеньков их корневой системы, которые способны преобразовывать  $\text{N}_2$  в  $\text{NH}_3$ , из которого продуцируются амины (Herridge, Peoples and Boddey, 2008). Скорость фиксации  $\text{N}_2$  зависит от наличия в почве  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NH}_4^+$ ; фиксация подавляется при высокой доступности  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NH}_4^+$  в почве, и наоборот. Скорость фиксации также зависит от наличия значительной химической энергии (углеводов) и других необходимых питательных элементов, включая фосфор, кальций и молибден. Дополнительным источником поступления активного азота в экосистемы является несимбиотическая фиксация  $\text{N}_2$  свободно живущими почвенными микроорганизмами (Ladha and others, 2016).

**Ключевое положение 10. Человеку и животным для роста, развития и жизнедеятельности требуется N-белок и аминокислоты, однако лишь небольшая часть потребляемого азота сохраняется для роста массы тела и/или в молоке и яйцах.**

108. Остальная часть выделяется из организма, в основном с мочой и фекалиями, и этот азот может быть переработан и использован повторно. Потребность животных в N-белке (или потребность в аминокислотах) в основном зависит от категории животных, массы тела, темпов роста, производства молока и яиц, активности (физическая активность, выпас) и воспроизводства (McDonald and others, 2010; Suttle, 2010). Ретенция азота в животноводстве в значительной степени зависит от породы, качества кормов, возраста и содержания стада и обычно колеблется от 5 % до 15 % в производстве говядины, от 15 % до 30 % в молочном производстве, от 25 % до 40 % в свиноводстве и от 40 % до 50 % в птицеводстве (Gerber and others, 2014). Остальное выделяется в виде мочевины в моче (мочевая кислота у птицы) и животного навоза. Как правило, половина экскреции N производится в форме мочевины (и аммония ( $\text{NH}_4^+$ )) и половина — в органически связанной форме, в зависимости от содержания белка в корме. Навоз и моча животных являются ценным источником питательных элементов и органического углерода в природных и сельскохозяйственных системах. Вместе с тем навоз и моча животных также являются основными источниками выбросов аммиака ( $\text{NH}_3$ ) и закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) в воздух, а также выщелачивания азота в грунтовые и поверхностные воды, в зависимости от технологии и условий окружающей среды.

## **D. Принципы комплексного устойчивого управления азотом в сельском хозяйстве**

109. В основе комплексного устойчивого управления азотом лежат 24 принципа:

**Принцип 1. Цель комплексного устойчивого управления азотом в сельском хозяйстве заключается в уменьшении потерь азота, попадающих в окружающую среду, для защиты здоровья человека, климата и экосистем при одновременном обеспечении достаточного производства продовольствия и эффективности использования азота, в том числе посредством обеспечения надлежащего равновесия входа азота.**

110. В качестве основного входящего фактора, наряду с водой, значение азота с точки зрения обеспечения продовольственной безопасности невозможно переоценить. Эффективность комплексного устойчивого управления азотом в сельском хозяйстве можно оценить с помощью согласованных показателей (см. вставку III.1 ниже).

**Принцип 2. Сельское хозяйство и пищевая цепочка включают различных акторов, каждый из которых выполняет определенную роль и функцию в управлении азотом.**

111. К их числу относятся:

- a) поставщики удобрений, кормов, зародышевой плазмы, семян, техники и кредитов;
- b) консультанты, службы распространения сельскохозяйственных знаний, специалисты в области бухгалтерского учета и финансовые организации;
- c) сельхозпроизводители;
- d) перерабатывающая и пищевая промышленность (растениеводческая, молочная, мясная, навозная);
- e) розничные организации;
- f) потребители;
- g) правительства и НПО, включая проверку пищевых продуктов на безопасность; и
- h) научное сообщество.

112. Очевидно, что сельхозпроизводители играют непосредственную роль в управлении азотом, повышении эффективности использования азота и минимизации потерь азота в окружающую среду. Поэтому фермеры получают экономическую выгоду и несут бремя мер, необходимых для снижения потерь азота. Внедрение определенных мер управления азотом дает чистый экономический эффект, что может способствовать планированию сельскохозяйственного бизнеса и развитию экономики замкнутого цикла. Что касается других мер, то расходы на их осуществление перевешивают выгоды для сельского хозяйства, вытекающие из более высокой ретенции азота в сельскохозяйственной системе, и могут быть целесообразны только с точки зрения окружающей среды, здоровья и климата. Чистые издержки пока еще трудно переложить на (распределить среди) других участников цепочки производства и потребления продовольствия, поскольку фермеры практически не имеют «рыночной силы» в глобализованной продовольственной системе. Сельхозпроизводители могут быть не готовы внедрять дорогостоящие меры для снижения потерь азота, поскольку они стремятся максимально повысить доходы и боятся потерять конкурентоспособность в сравнении с фермерами, которые не тратятся на такие меры. Поэтому, возможно, нужно рассмотреть возможности предоставления доступа к финансированию/кредитованию с помощью соответствующих инструментов в рамках политики, направленной на поддержку перехода к более комплексному устойчивому управлению азотом. **Таким образом, все участники продовольственной цепочки, в том числе директивные органы на нескольких уровнях, несут совместную ответственность за усилия по сокращению потерь азота и за совместное покрытие затрат и пользование выгодами, связанными с мерами по сокращению потерь/смягчению последствий выбросов азота. Эти усилия должны**

осуществляться в увязке с другими важнейшими стратегиями, включая смягчение последствий изменения климата.

**Принцип 3. Для снижения потерь азота в конкретных процессах требуются специальные меры.**

113. Основными механизмами потерь азота в сельском хозяйстве являются:

- a) улетучивание  $\text{NH}_3$ ;
- b) выщелачивание (в основном) нитратов в грунтовые воды, а затем в поверхностные воды;
- c) поверхностный сток и эрозия практически всех форм азота в поверхностные воды; и
- d) процессы нитрификации-денитрификации в сочетании с газообразными выбросами  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ .

114. На эти механизмы влияет комплекс факторов, включая доступность и форму источников азота, климат, почвенные и геоморфологические/гидрологические условия и технологию. **Меры, ориентированные на конкретные механизмы, должны учитывать факторы, влияющие на эти механизмы** (Hatfield and Follett, 2008; Bitmann and others 2014; UNEP, 2013).

#### Вставка III.1

#### **Показатели для оценки эффективности комплексного устойчивого управления азотом**

Одна из основных целей комплексного устойчивого управления азотом в сельском хозяйстве заключается в снижении потерь азота в окружающую среду в интересах защиты здоровья человека, климата, экосистем и других аспектов экономики и устойчивости при одновременном обеспечении достаточного производства продукции растениеводства и животноводства (принцип 1).

Индикаторы, отражающие этот принцип, были предложены Экспертной группой Европейского союза по азоту (Oenema and others, 2015) с акцентом на эффективность использования азота (ЭИА):

ЭИА = сумма выходов N/сумма входов N (в процентах, %)

Избыточный N = сумма входов N – сумма выходов N (кг N/га/год)

N в собранном урожае или другом использованном объеме продукции (кг N/га/год)

Очевидно, что высокая ЭИА указывает на эффективное использование поступающего в систему N. Низкий уровень избыточного N указывает на низкую возможную потерю азота и ее слабое воздействие на окружающую среду, а также на то, что большая часть поступающего азота рекупируется в собранной продукции. Этот подход актуален для различных контекстов: растениеводства, животноводства, агропищевой системы и для всей экономики в целом (Bleeker and others, 2013; Sutton and others, 2013; Westhoek and others, 2015; Erisman and others, 2018).

Воздействие мер, направленных на снижение потерь азота в конкретных процессах, обычно выражается эффективностью борьбы с загрязнением (ЭБЗ), сокращением потерь азота и общим изменением ЭИА:

ЭБЗ = (потери N без мер по борьбе с загрязнением – потери N с мерами по борьбе с загрязнением)/потери N без мер по борьбе с загрязнением (в процентах, %)

Общее сокращение потерь N (кг N/га/год)

Изменение ЭИА = (ЭИА скорректированная – ЭИА исходная)/ЭИА исходная (в процентах, %)

В другом подходе, направленном на снижение общего воздействия на окружающую среду, оценивается доля глобального и национального сокращения общего объема «азотных отходов», по которым понимается сумма всех потерь азота в окружающую среду (включая  $N_2$  и все формы  $N_r$ ). Этот подход отражен в амбициозной цели Декларации Коломбо (UNEP, 2019; Sutton and others, 2019) — «сократить вдвое потери азота» из всех источников в качестве вклада в достижение Целей устойчивого развития Организации Объединенных Наций:

$$\text{Сокращение общих потерь } N = \frac{(\text{исходные потери } N - \text{скорректир. потери } N)}{\text{исходные потери } N} \quad (\text{в процентах, } \%)$$

Если ЭБЗ описывает эффективность конкретных мер по каждой форме потерь азота, то величина сокращения общего объема потерь азота подчеркивает выигрыш от всех сокращений потерь азота с использованием всех подходов на национальном, региональном и глобальном уровнях. Необходима дальнейшая работа по согласованию международных протоколов по каждому из этих показателей, чтобы помочь странам в подготовке данных и обеспечить возможность обоснованного сравнения различных значений показателей и целевых значений.

**Принцип 4. Возможные компромиссы в отношении воздействия мер по сокращению потерь азота могут потребовать определения приоритетов, например, в отношении того, какие неблагоприятные воздействия должны быть рассмотрены в первую очередь.**

115. На практике результат будет зависеть от количественной оценки — небольшой негативный эффект от одного воздействия может быть допустимым при наличии масштабного улучшения в другом месте — и от политических руководящих указаний в отношении того, как сравнить важность вопросов (например, эвтрофикация по отношению к выбросам парниковых газов через выбросы  $N_2O$  в сравнении с воздействием на здоровье человека через выбросы  $NH_3$  и связанное с этим образование дисперсных частиц  $PM_{2,5}$  (Sutton and others, 2011)). Также возможны не связанные с азотом компромиссы в сельском хозяйстве и даже компромиссы в других отраслях, помимо сельского хозяйства. Для обоснования таких приоритетов и надлежащей оценки возможных вариантов с учетом местного контекста и воздействия на глобальном уровне необходимы руководящие указания по мерам политики.

**Принцип 5. Меры контроля поступления азота влияют на все механизмы потери азота.**

116. Эти меры привлекательны с точки зрения сокращения потерь на основе комплексного подхода, поскольку снижение поступления азота (например, за счет предупреждения использования избыточных количеств удобрений, избыточного содержания белка в рационе питания животных и продуктов питания для человека с высоким азотным следом) приводит к уменьшению потока азота через всю систему «почва — корма — продовольствие», снижая потери во всех формах загрязнения азотом; Например, Westhoek and others (2015) показали, что сокращение вдвое потребления мясных и молочных продуктов европейскими гражданами (которое в настоящее время превышает потребности для здоровья) уменьшит загрязнение азотом на 40 % (по  $NH_3$ ) и на 25–40 % (по выщелачиванию  $N_2O$  и  $NO_3^-$ ) при отсутствии каких-либо технических мер. Причина сокращения загрязнения  $N_2O$  и  $NO_3^-$  заключается в том, что значительные сельскохозяйственные угодья будут высвобождены для других целей, делая возможным такие альтернативы, как увеличение производства сельскохозяйственных культур на экспорт (чистое 25-процентное сокращение выбросов) или «меры по экологизации», которые обеспечивают максимальное сокращение азотного загрязнения (чистое 40-процентное сокращение выбросов). Необходимы дальнейшие оценки для анализа последствий потребления неосновных продуктов и напитков неживотного происхождения.

**Принцип 6. Меры по сокращению одной формы загрязнения оставляют в сельскохозяйственной системе больше азота, доступного для удовлетворения потребностей выращиваемых растений и животных.**

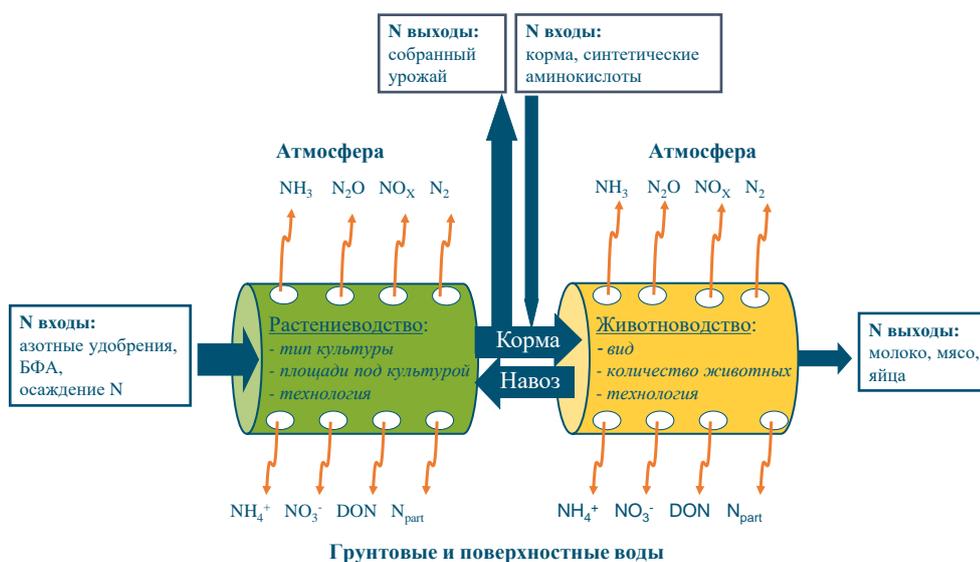
117. Это означает, что сокращение одной формы потерь азота связано с риском увеличения потерь азота в других формах, что иногда называют «заменой загрязняющих веществ», если не будут изменены входные и выходные потоки (включая запасание азота в почвах). Чтобы реализовать преимущество той или иной меры по сокращению потерь азота (и избежать «замены загрязняющих веществ»), объем потерь азота, которые удалось предотвратить с помощью этой меры, должен быть уравновешен уменьшением поступления азота, либо увеличением количества азота в собранном продукте (включая запасание азота в почвах). Поэтому сокращение вводимого азота и повышение продуктивности являются важной частью системы комплексного управления азотом, при этом должна обеспечиваться возможность повышения экономических показателей (Oenema and others, 2009; Quemada and others, 2020).

**Принцип 7. Баланс «вход — выход» по азоту воплощает в себе правило «количество на входе должно быть равно количеству на выходе», т. е. этот баланс является основным показателем управления азотом.**

118. Согласно закону сохранения массы, количество на входе должно соответствовать количеству на выходе или количеству, временно запасенному в сельскохозяйственной системе. Следовательно,  $N_{\text{вход}} = N_{\text{выход}}$  в собранной продукции (+ временное хранение  $N$ ) — потери  $N$  (см. рис. III.1 ниже). Это также показывает, что управление поступлением азота является основным механизмом снижения потерь  $N$ . Это также позволяет применять стратегии, основанные на максимальном увеличении пулов хранения азота, в том числе в навозе, почве и растениях (например, путем содействия усвоению азота растениями). Для составления этих балансов «вход — выход» по азоту необходимы согласованные на международном уровне протоколы; входы  $N$  и выходы  $N$  должны учитываться единообразно, чтобы можно было проводить справедливые сравнения между фермами и регионами и исключить предвзятость.

Рис. III.1

**Концепция массового баланса «вход — выход» по азоту — смешанные системы производства, объединяющие растениеводство и животноводство**



Источник: по материалам Oenema and others (2009).

*Примечание:* модель «труба с утечкой» (согласно Firestone и Davidson, 1989) иллюстрирует «утечки в цикле N» в растениеводстве и животноводстве; она показывает преобразования поступающего азота в сельском хозяйстве. Поступающие и выводимые количества в полезных продуктах и выбросах в атмосферу и воду демонстрируют зависимость в растениеводстве и животноводстве; изменение скорости одного потока азота сказывается на других потоках и также зависит от аккумулирующей способности системы. Общий объем на входе должен соответствовать общему объему на выходе, с учетом корректировок на возможные изменения в аккумулирующей способности системы. Эта концепция применима в уровне отдельного участка, фермерского хозяйства, в региональном и глобальном масштабах для всех типов хозяйств (Oenema and others, 2009).

**Принцип 8. Обеспечение соответствия количеств вводимого азота потребностям сельскохозяйственных культур (иначе говоря «сбалансированное использование удобрений») и соответствия содержания протеина N потребностям сельскохозяйственных животных открывает возможности для одновременного снижения потерь азота во всех формах, что позволяет одновременно улучшить экономические показатели.**

119. Таким образом, повышение «частичной производительности факторов производства» (объем продукции на единицу азота на входе) повышает эффективность использования азота и снижает все формы потерь азота. Это прямо вытекает из вышеупомянутого закона о сохранении массы. Кроме того, при согласовании вводимого N с потребностями полевых культур необходимо учитывать закон убывающего плодородия почвы; при увеличении вводимого N урожайность и усвоение азота увеличиваются лишь незначительно, тогда как потери азота, зачастую, постепенно растут. Эти основные принципы в равной мере относятся как к растениеводству, так и животноводству, и к производству продуктов питания в целом.

**Принцип 9. Пространственные вариации в уязвимости сельскохозяйственных земель к потерям азота требуют применения пространственно-эксплицитных мер по управлению азотом на полях и/или в ландшафте (в том числе с помощью прецизионных агрометодов и приемов).**

120. Ввиду того, что поверхность земли часто имеет наклон, почвы нередко неоднородны по своей природе, а погода изменчива и неопределенна, условия произрастания культур, доставки азота в почвы и механизмы потери азота вариативны в пространстве и времени. Учет таких пространственно-дифференцированных условий возможен только с помощью локальной тонкой настройки приемов ведения сельского хозяйства (таких как «прецизионные методы ведения сельского хозяйства», в которых технологии корректируются для каждого поля) и использования индивидуальных мер по снижению выбросов для каждого участка. Этот принцип применим к внесению как органических, так и неорганических удобрений (см. главу V).

**Принцип 10. Пространственные вариации в чувствительности естественных местообитаний к азотным нагрузкам, связанным с сельскохозяйственной деятельностью, диктуют необходимость принятия мер по управлению азотом, адаптированных под условия данной местности и региона.**

121. Подход «источник — путь — получатель» позволяет определить конкретные «горячие точки», конкретные механизмы потери азота, а также выделить конкретные чувствительные зоны. Это особенно актуально для естественных сред обитания, чувствительных к азотной нагрузке в сельскохозяйственном ландшафте с интенсивным животноводческим производством; последние, вероятно, являются «горячими точками» по выбросам NH<sub>3</sub>, в то время как естественные среды обитания, скорее всего, обладают высокой чувствительностью к поступлению азота через атмосферное осаждение. Тот же принцип действует в отношении водоемов с питьевой водой, нетронутых озер, ручьев и прибрежных акваторий; они нуждаются в особой защите для предотвращения загрязнения. Этот принцип лежит в основе дополнительных выгод от управления N на уровне ландшафта (см. главу VI).

**Принцип 11. Структура элементов ландшафта влияет на способность сохранения и буферизации потоков азота. Это означает, что экосистемы с высокой способностью сохранения азота (например, лесные массивы и неудобряемые сельскохозяйственные земли), как правило, служат буфером, который компенсирует воздействие азотных соединений, выбрасываемых в атмосферу, в результате чего меньшее количество азота переносится в другие места.**

122. Этот принцип в равной степени действует в отношении неудобряемых буферных полос и защитных зон вдоль чувствительных к азоту водотоков. Лесные массивы и неудобряемые сельскохозяйственные земли — виды землепользования, способные поглощать и вновь запускать в оборот (утилизировать) поступления азота из процесса атмосферного осаждения (например, Dragosits and others, 2006; см. главу VI). Пограничные и переходные зоны в сельскохозяйственном ландшафте также являются средой обитания для таких уязвимых организмов, как опылители, сохраняя биоразнообразие. Таким образом, лесные массивы, обширные сельскохозяйственные угодья и другие ландшафтные элементы позволяют абсорбировать и возвращать в оборот азот, поступающий в процессе атмосферного осаждения азота, и азот, который в противном случае был бы потерян в результате латерально направленного потока воды. Этот принцип лежит в основе планирования повышения общей устойчивости ландшафта, где, например, посадка новых лесных массивов (специально с целью поглощения азота) может стать частью комплекса мер по содействию защите других местообитаний (включая другие лесные массивы и экосистемы, где природоохранные цели являются согласованным приоритетом). Вместе с тем лесные почвы — рецепторы больших объемов азота в результате интенсивного процесса осаждения азота в течение длительного времени могут превратиться из поглотителя в источник загрязнения азотом; например, выбросов  $\text{NO}_x$  (Luo and others, 2012; Medinets and others, 2019). Это также относится к буферным полосам и прибрежным зонам вдоль водотоков; способность использовать или запастись активный азот и/или преобразовывать активный азот в  $\text{N}_2$  может изменяться со временем (глава VI).

**Принцип 12. Для минимизации загрязнения, связанного с потерями азота, все факторы, определяющие, ограничивающие и тормозящие рост сельскохозяйственных культур, должны рассматриваться одновременно и сбалансированно, чтобы оптимизировать продуктивность растений и эффективность использования азота.**

123. Продуктивность, поглощение азота и эффективность использования азота зависят от:

- a) факторов, определяющих продуктивность (сорт и разновидность культуры, климат);
- b) факторов, ограничивающих продуктивность (доступность всех 14 основных питательных элементов и воды, а также качество почвы); и
- c) факторов, снижающих продуктивность (конкуренция с сорняками, вредители и болезни, наличие в почве высокорастворимых солей и/или токсичных соединений, а также загрязнение воздуха (например, озоном) (van Ittersum and Rabbinge, 1997).

124. Согласно закону оптимума, наибольшее позитивное воздействие азота на продуктивность достигается тогда, когда все определяющие продуктивность факторы находятся на оптимальных уровнях, а факторы, ограничивающие и снижающие продуктивность, сведены к нулю (De Wit, 1992). Таким образом, это влияет на потери азота в окружающую среду. Поэтому оптимизация продуктивности и эффективности использования азота и сокращение выбросов азота в растениеводстве требуют применения комплексного подхода, включающего:

- a) отбор сортов высокоурожайных культур, адаптированных к местным климатическим и экологическим условиям;

b) подготовку посадочных площадей в соответствии с типом посадочного материала перед посевом/посадкой и обеспечение достаточного количества всех необходимых питательных элементов и воды; и

c) и обеспечение надлежащих мер по борьбе с сорняками, вредителями и болезнями, а также с загрязнением окружающей среды.

125. С учетом всего комплекса действующих факторов оптимизация продуктивности является не простой задачей. Например, не до конца поняты важные положительные и отрицательные эффекты чередования культур. Возникают проблемы устойчивости к пестицидам, инвазивных видов, изменения климата и т. д.

**Принцип 13. Для минимизации загрязнения, связанного с потерями азота, все факторы, определяющие, ограничивающие или тормозящие рост животных, должны рассматриваться одновременно и сбалансированно, чтобы оптимизировать производство животноводческой продукции и эффективность использования азота, которые могут также уменьшить экскрецию азота на единицу продукции животноводства.**

126. Продуктивность животноводства и удержание азота в продуктах животноводства также зависят от:

a) факторов, определяющих продуктивность (вид и порода животных, климат);

b) факторов, ограничивающих продуктивность (качество кормов, наличие всех 22 основных питательных элементов и воды); и

c) факторов, снижающих продуктивность (болезни, фертильность, токсичность, загрязнение воздуха, например, аммиак,  $H_2S$ , озон).

127. Согласно закону оптимума, оптимизация животноводческого производства и эффективности использования азота в животноводстве, а также снижение потерь азота требуют комплексного подхода, включающего:

a) отбор видов и пород животных, адаптированных к местным климатическим и экологическим условиям;

b) обеспечение наличия высококачественных кормов и воды, эффективных систем кормления и содержания поголовья; и

c) принятие мер по обеспечению контроля за болезнями, здоровьем, рождаемостью и загрязнением, включая благополучие животных (McDonald and others, 2010; Suttle, 2010).

128. Оптимизация должна учитывать репродуктивную фазу, включая количество лактаций, коэффициент зачатия, вес при рождении и т. д. Этот и предыдущий принцип в равной степени относятся к смешанным системам растениеводства и животноводства.

**Принцип 14. Замедление гидролиза мочевины и ресурсов, содержащих мочевую кислоту, позволяет снизить выбросы  $NH_3$ .**

129. Гидролиз этих ресурсов продуцирует  $NH_3$  в растворе и увеличивает рН, поэтому замедление гидролиза позволяет предупредить повышение до максимумов концентрации аммония и рН, что также может снизить другие потери азота, избегая кратковременного избытка азота. Этот принцип лежит в основе ряда мер в области управления навозом и удобрениями. К примеру, незамедлительное сепарирование мочи и фекалий позволяет сократить выбросы  $NH_3$ , поскольку моча содержит большую часть мочевины, в то время как фекалии богаты ферментной уреазой, которая расщепляет мочевину, в результате чего выделяются  $CO_2$  и  $NH_3$ . Тот же принцип лежит в основе преимущества содержания птичьего помета в сухом состоянии, что позволяет избежать распада мочевой кислоты, который аналогичным образом сопровождается выделением  $NH_3$ . Ингибиторы уреазы — вещества, добавляемые в карбамидное удобрение для снижения выбросов  $NH_3$  и других

потерь N. Снижая эффективность фермента уреазы, эти продукты замедляют гидролиз мочевины (Bitmann and others, 2014).

**Принцип 15. Сведение к минимуму контакта богатых аммиаком ресурсов с воздухом играет важнейшую роль для сокращения выбросов NH<sub>3</sub>.**

130. Таким образом, сокращение площади поверхности и покрытие богатых аммонием ресурсов снижает выбросы NH<sub>3</sub>. Снижение pH (до ≤6,5) ресурсов с высоким содержанием аммония также снижает выбросы NH<sub>3</sub>. Снижение температуры ресурсов с высоким содержанием аммония и скорости потока воздуха над поверхностью также сокращает выбросы NH<sub>3</sub>. Все эти методы сокращения выбросов должны применяться с учетом комплексного подхода ко всей цепочке операций по управлению навозом, с тем чтобы свести к минимуму потери на последующих этапах азота, запасенного в начале части цепочки управления навозом (Bittman and others, 2014).

**Принцип 16. Замедление нитрификации (биологического окисления NH<sub>4</sub><sup>+</sup> до NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) может способствовать снижению потерь азота и повышению эффективности использования азота.**

131. Благодаря положительному заряду ион NH<sub>4</sub><sup>+</sup> может удерживаться в почве (в зависимости от способности почвы к катионному обмену). Это означает, что ион NH<sub>4</sub><sup>+</sup> менее мобилен и менее подвержен потерям в результате процессов выщелачивания и нитрификации-денитрификации, чем ион NO<sub>3</sub><sup>-</sup> — другая основная форма азота в почве, используемая растениями. Таким образом, создание условий, подавляющих процесс биологического окисления NH<sub>4</sub><sup>+</sup> до NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, может способствовать снижению потерь азота и повышению эффективности использования азота. Синтетические ингибиторы нитрификации и биологические ингибиторы нитрификации, выделяемые корнями и листьями растений, замедляют нитрификацию и помогают сохранить N в системе и тем самым могут повысить эффективность использования N. Вместе с тем необходимо учитывать возможные (долгосрочные) побочные эффекты таких стратегий на здоровье почвы (включая почвенное микробное сообщество) (Medinets, and others, 2015; Lam and others, 2017; Coskun and others, 2017; Norton and Ouyang, 2019).

**Принцип 17. Некоторые меры, направленные на сокращение выбросов N<sub>2</sub>O, могут также снизить потери N<sub>2</sub>, поскольку и те и другие связаны с процессами денитрификации.**

132. И наоборот, меры, направленные на подавление процесса денитрификации до N<sub>2</sub>, также могут сократить выбросы N<sub>2</sub>O. Потери азота в сельском хозяйстве через закись азота N<sub>2</sub>O относительно невелики, однако N<sub>2</sub>O является мощным парниковым газом и способствует истощению озонового слоя стратосферы (UNEP, 2013). На связанные с этим потери N<sub>2</sub> в результате процессов нитрификации — денитрификации приходится значительно большая потеря азота, хотя выбросы N<sub>2</sub> не оказывают прямого негативного влияния на окружающую среду. Поэтому меры, направленные на одновременное сокращение выбросов N<sub>2</sub>O и N<sub>2</sub> в результате процессов нитрификации — денитрификации, могут способствовать экономии азотных ресурсов внутри системы.

**Принцип 18. Достижение значительного сокращения выбросов N<sub>2</sub>O в сельском хозяйстве требует сосредоточения внимания на повышении эффективности использования азота по всей агропродовольственной системе с использованием всех доступных мер.**

133. Решение этой задачи требует общесистемных изменений в рационе питания человека, кормления животных, рационального использования удобрений, а также биологических и рециркулируемых азотных ресурсов. Требование в отношении глубоких системных изменений связано с тем, что возможности конкретных технических мер по сокращению выбросов N<sub>2</sub>O из сельскохозяйственных источников ограничены в сравнении с масштабными задачами сокращения выбросов в целях борьбы с изменением климата и снижением концентрации стратосферного озона

(Oenema and others, 2013; UNEP, 2013; Cayuela and others, 2017; Thompson and others, 2019). В то же время сосредоточение внимания на повышении эффективности всей системы целиком — это правильный подход, который акцентирует сопутствующие выгоды в области экономики, окружающей среды и здравоохранения.

**Принцип 19. Стратегии, направленные на одновременное снижение потерь N, P и других питательных веществ в сельском хозяйстве дают дополнительные выгоды в плане сокращения выбросов/смягчения воздействия азота по сравнению со стратегиями снижения выбросов одиночных питательных веществ, поскольку они связаны с круговоротом питательных веществ.**

134. Так, взаимодействие между N и P влияет на эффективность использования N и P в растениеводстве и животноводстве, а также на их воздействие на эвтрофикацию поверхностных вод. Недостаток P ограничивает усвоение и использование N и P в растениеводстве и животноводстве и может снизить эвтрофицирующее воздействие азота на поверхностные воды. И наоборот, дефицит N ограничивает усвоение и использование P в растениеводстве и животноводстве и может снизить эвтрофицирующее воздействие P на поверхностные воды (Conley and others, 2009). Однако избыток N и P снижает эффективность использования как N, так и P, значительно увеличивает риск потерь N и P и усиливает их эвтрофицирующее воздействие на поверхностные воды. Кроме того, по оценкам, общие потери как N, так и P уже превышают «планетарные границы», что указывает на то, что потери N и P должны значительно снизиться (Steffen and others, 2015; Springmann and others, 2018). Хотя высказанные выше соображения иллюстрируют научные причины, обосновывающие необходимость совместного управления циклами питательных веществ (Sutton and others, 2013), имеются также социальные и политические барьеры, связанные с разработкой многосекторальных парадигм (воздух, вода, климат и т. д.) и готовностью секторов к изменениям. Таким образом акцент на азот обеспечивает прагматичность подхода, который поощряет установление связей между многочисленными угрозами и круговоротом элементов, тем самым ускоряя прогресс.

**Принцип 20. Стратегии, направленные на оптимизацию совместного использования азота и воды, более эффективны, чем отдельные стратегии применения азотных удобрений и ирригации в полувлажных и засушливых условиях.**

135. Взаимодействие между азотом и водой влияет на азот и эффективность использования воды в растениеводстве, а также на все механизмы выбросов азота (Quemada and Gabriel, 2016). Нехватка воды ограничивает усвоение и использование азота в растениеводстве и может снизить потери азота в результате процессов выщелачивания и денитрификации в зависимости от характеристик почвы; это может приводить к накоплению нитрата N в почве. Кроме того, выпадение осадков и орошение дождеванием могут сократить потери азота за счет улетучивания NH<sub>3</sub> при внесении в почву мочевинных удобрений и животного навоза (Sanz-Cobena and others, 2011). И наоборот, избыток азота снижает эффективность использования воды в растениеводстве. Увязка управления азотом и водными ресурсами также лежит в основе безопасного хранения твердого навоза, которое позволяет предотвратить смыв и выщелачивание. Однако избыток азота и воды снижает эффективность использования азота и воды и значительно увеличивает риск потерь азота в результате выщелачивания, эрозии и денитрификации. Применение нормированного количества воды и азота с помощью метода капельного орошения (фертигации) в полувлажных районах может значительно повысить одновременно эффективность использования азота и воды, а также минимизировать потери азота. Кроме того, урожайность сельскохозяйственных культур в мировом масштабе в целом ограничена наличием как воды, так и N (Mueller and others, 2012). Это подчеркивает необходимость комплексного подхода, в котором наличие как азота, так и воды рассматривается совместно, особенно в тех регионах мира, где производство продовольствия ограничено наличием воды и азота, и где необходимо увеличить производство продовольствия для удовлетворения потребностей растущего населения (Godfray and

others, 2010). Орошение должно использоваться разумно, чтобы сохранить воду и избежать засоления почвы, особенно на почвах тонкого гранулометрического состава.

**Принцип 21. Стратегии, направленные на повышение эффективности использования азота в растениеводстве и снижение потерь азота на сельскохозяйственных угодьях, должны учитывать возможные изменения со временем содержания органического углерода (С) в почве и качества почвы, а также воздействие стратегий связывания углерода в почве.**

136. Соотношение углерода к азоту в органическом веществе почвы колеблется примерно от 10–15 (в органических почвах оно превышает 30). Этот довольно узкий диапазон имеет ряд последствий. Во-первых, секвестрация углерода в почве, направленная на сокращение выбросов углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в атмосферу и улучшение качества почвы, связана с секвестрацией азота в почве. Если это позволяет снизить соотношение С:N и, следовательно, повысить оборачиваемость азота в почве, то существует риск, что в результате могут возрасти потери азота (включая прямые и косвенные выбросы N<sub>2</sub>O), особенно при низких значениях усвоения растениями. Во-вторых, сохранение органического С в почве означает, что сначала органический С должен быть произведен. Хотя это может быть достигнуто за счет увеличения производства сельскохозяйственных культур, существует риск того, что регулирование, необходимое для увеличения поступления азота в почву (т. е. растительных остатков), может привести к снижению эффективности использования азота. Например, достижение целей инициативы «4 на 1000»<sup>13</sup> может привести к тому, что пул азота в почве будет практически эквивалентен текущему ежегодному глобальному использованию азотных удобрений (Van Groenigen and others, 2017). Поэтому в комплексных стратегиях управления азотом необходимо учитывать возможные взаимодействия между С и N в почве и влияние качества почвы и эффективности использования азота (Cassman, 1999). Кроме того, защита органического вещества почвы от деструкции, например, в результате чрезмерной обработки почвы (обеднение почвы азотом) и эрозии, должна стать первоочередной задачей, чтобы иметь возможность поддерживать продуктивность сельского хозяйства, особенно в регионах с низким уровнем поступления азота; например, Африка и Восточная Европа (Boincean and Dent, 2019).

**Принцип 22. Стратегии, направленные на сокращение выбросов NH<sub>3</sub> азота из животного навоза путем использования низкопротеиновых кормов, должны учитывать возможное воздействие изменений кормового рациона на выбросы энтерального метана (CH<sub>4</sub>), продуцируемого жвачными животными.**

137. Богатые протеином корма способствуют относительно высокой экскреции азота, а образующийся при этом навоз имеет высокий показатель выбросов NH<sub>3</sub> в результате улетучивания. Напротив, использование низкопротеиновых кормов способствует относительно низкой экскреции азота, а образующийся при этом навоз имеет низкий показатель выбросов NH<sub>3</sub> в результате улетучивания. Однако некоторые низкопротеиновые корма могут иметь относительно высокое содержание волокон, что увеличивает продуцирование энтерального CH<sub>4</sub> жвачными животными (Dalgaard and others, 2015). Метан является мощным парниковым газом, а жвачные животные — одним из основных глобальных источников выбросов CH<sub>4</sub> в атмосферу. Очевидно, что целью состоит в оптимизации уровней белка и волокон в рационе жвачных животных, чтобы свести к минимуму выбросы как NH<sub>3</sub>, так и CH<sub>4</sub> (Bittman and others, 2014; Hristov and others, 2019; Van Gastelen and others, 2019). Особенно для жвачных животных важно сбалансировать разлагаемость белка (и, возможно, танинов) с уровнем и доступностью энергии, например с помощью повышения концентрации сахара, что также может улучшить вкусовые качества и потребление. Высокое содержание сахара может улучшить процесс силосования, тем самым снижая потери из-за порчи.

<sup>13</sup> См. URL: <http://www.4p1000.org>.

**Принцип 23. При определении стоимости и эффективности мер по сокращению потерь азота необходимо учитывать практические ограничения и возможности, имеющиеся у фермеров в регионе, где предполагается внедрение этих мер.**

138. Анализ эффективности и затрат должен быть в максимально возможной степени приближен к реальным условиям ведения хозяйства и, в частности, учитывать размер хозяйства и основные экологические ограничения. Методы управления должны апробироваться в реальных условиях хозяйства, а передовая практика должна распространяться в фермерском сообществе. Важную роль играют такие социально-экономические факторы, как уровень образования и возраст фермеров, наличие квалифицированной рабочей силы, а также доступ к качественным консультационным услугам и к финансам. При анализе эффективности затрат следует учитывать факторы, препятствующие внедрению, а также побочное воздействие применяемых методов на другие формы азота и парниковые газы, с тем чтобы содействовать получению сопутствующих выгод.

**Принцип 24. Уровень хозяйства в целом зачастую является основным уровнем интеграции для принятия решений по предупреждению выбросов/смягчению последствий, и на этом уровне необходимо будет оценивать общую эффективность мер по предупреждению выбросов/смягчению последствий.**

139. Взаимодействие между различными мерами и взаимодействие между выбросами азота и парниковых газов (ПГ) можно эффективно оценить на уровне всей сельскохозяйственной системы, включая учет более широких ландшафтных, региональных и трансграничных взаимодействий.

## **Е. Инструменты реализации комплексных подходов к управлению азотом**

140. Инструментарий для разработки комплексных подходов к управлению азотом содержит как универсальные, так и более специфические инструменты, подходящие только для какого-либо одного аспекта комплексного подхода. Основными универсальными инструментами являются:

- a) системный анализ;
- b) расчет бюджета N «вход — выход»;
- c) модели для комплексной оценки и анализ «затраты/выгоды»;
- d) управление пищевой цепочкой;
- e) диалог и коммуникация между заинтересованными сторонами; и
- f) так называемые наилучшие методы управления (НМУ).

141. Эти инструменты реализации комплексных подходов к управлению азотом в общих чертах кратко рассматриваются ниже. Конкретные меры рассматриваются в главах IV–VI:

a) **Системный анализ** представляет собой отправную точку для разработки комплексных подходов, поскольку он позволяет получить информацию, необходимую для всех аспектов комплексного подхода. Системный анализ позволяет идентифицировать и количественно оценить компоненты, процессы, потоки, участников, взаимодействия и взаимосвязи внутри систем и между ними. Он представляет собой практический инструмент для обсуждения комплексных подходов к управлению азотом. По существу, системный анализ исходит из того, что изменение в одном компоненте вызывает изменения во всех компонентах систем. Инструменты такого типа особенно полезны применительно к интерфейсу «наука — политика — практика».

b) **Бюджеты азота** позволяют соотносить поступающий и выводимый азот в системах (например, фермерском хозяйстве, водосборном бассейне, стране) и компонентах этих систем. Бюджеты азота являются незаменимым инструментом,

поскольку позволяют свести воедино источники азота для четко определенных областей и/или компонентов (Zhang and others, 2020). Они позволяют рассчитать азотный баланс, который представляет собой разницу между поступающим и выводимым азотом. Баланс азота отражает количество азота, хранящегося или удаляемого из системы, плюс потери азота из системы в более широкую окружающую среду. Балансы «вход — выход» являются надежными и простыми в понимании инструментами управления для фермеров (Jarvis and others, 2011) и директивных органов. Они полезны тем, что помогают определить приоритеты в оптимизации вводимых ресурсов и в сокращении непреднамеренных потерь, а также обеспечивают основу для мониторинга эффективности системы или избытков, которые могут быть потеряны в виде выбросов. Бюджеты азота являются гибкими инструментами, но требуют протоколов (таких, как соответствующие стандартные значения концентраций азота в различных материалах) для единообразного учета поступающих и выводимых количеств азота, чтобы обеспечить корректное сравнение между фермами и между секторами и избежать искажений (Leip and others, 2011; UNECE, 2013).

с) **Модели для комплексной оценки** позволяют моделировать взаимосвязи между выбросами, выбросами — мерами по их сокращению, воздействиями на экологию и выгодами от смягчения последствий воздействия азота, включая взаимосвязи между затратами и выгодами и установление целевых показателей. Модели для комплексной оценки также позволяют проанализировать возможные последствия мер реагирования со стороны общества (акторов) с помощью сценарного анализа. В качестве основы для концептуального анализа причинно-следственных связей может быть использована структура ДНСВР; она увязывает драйверы экологических изменений (например, рост численности населения, экономический рост, развитие технологий), давление на окружающую среду (например, выбросы  $N_r$ ), состояние окружающей среды (например, концентрация азота в воздухе и воде и осаждение азота в естественных средах обитания), воздействие (например, здоровье человека, биоразнообразие, экономический рост, эвтрофикация, экосистемные услуги) и ответные меры общества (например, меры политики, изменения в поведении; ЕЕА, 1995). Примеры комплексных оценок включают обзоры Гётеборгского протокола, проведенные Целевой группой по разработке моделей для комплексной оценки (TFIAM/CIAM, 2007). Анализ «затраты/выгоды» (АЗВ) идет еще дальше, выражая затраты и выгоды мер политики в денежном эквиваленте (Hanley and Barbier 2009; OECD, 2018). В качестве полезного инструмента была также предложена стратегическая экологическая оценка (СЭО). СЭО представляет собой систематический процесс поддержки принятия решений, направленный на обеспечение эффективного учета экологических аспектов при планировании политики и разработке программ (Fischer, 2007; Ahmed and Sánchez-Triana, 2008). Протокол ЕЭК ООН по стратегической экологической оценке к Конвенции об оценке воздействия на окружающую среду в трансграничном контексте устанавливает юридически обязательные требования.

d) **Оценка и управление продовольственной цепочкой** охватывают планирование и управление деятельностью, а также информационными потоками между участниками всей цепочки производства-потребления продуктов питания, включая поставщиков, перерабатывающие отрасли, розничные предприятия, компании, занимающиеся переработкой отходов, а также граждан. По сути, управление продовольственной цепочкой охватывает подготовку и использование информации и деятельность внутри и между всеми участниками по всей цепочке (Erismann and others, 2018). Конкретные вопросы в этом контексте:

- i) как обеспечить, чтобы потребители имели доступ к питательным продуктам и знали о них, а также располагали информацией об устойчивом выборе продуктов питания;
- ii) каким образом производители могут удовлетворить требования потребителей, например, по качеству, способам производства и азотному следу;
- iii) каким образом все участники продовольственной цепочки возмещают затраты на меры по снижению выбросов, осуществляемые производителями; и

iv) как свести к минимуму пищевые отходы и продовольственные потери и как обеспечить рециклизацию всех отходов в пищевой цепочке с их возвращением в пахотные земли. Этот вид управления производственной цепочкой пока еще слабо проработан, кроме как в некоторых секторах пищевой промышленности.

е) **Диалог и коммуникация с заинтересованными сторонами** необходимы для обмена мнениями участников по вопросам управления азотом. Диалог между заинтересованными сторонами — это взаимодействие различных заинтересованных сторон для решения конкретных проблем, связанных с конкурирующими интересами и взглядами на вопросы, связанные с использованием азота и других ресурсов и управления ими. Коммуникация — это процесс передачи информации всем заинтересованным сторонам и средство повышения осведомленности и разъяснения им значения, цели, задач и действий в рамках комплексных подходов к управлению азотом. Эффективная коммуникация крайне важна, поскольку зачастую возникает неопределенность в употреблении терминов «комплексный» и «управление», а также недостаточная ясность в отношении целей и требуемых действий. Коммуникация (и обучение) может помочь сделать прозрачными ключевые концепции и тем самым облегчить принятие целевых показателей и осуществление согласованных мер на практике.

ф) **Наилучшие методы управления и меры по сокращению выбросов/смягчению воздействия.** Концепция наилучших методов управления (НМУ) включает в себя наилучшие имеющиеся технологии (НИМ) и наилучшую системную практику (НСП). В случае азота они охватывают комплекс мероприятий и технологий, основанных на вышеупомянутых принципах комплексного устойчивого управления азотом. НМУ можно определить как управленческую практику, которая, как было продемонстрировано, дает в среднем наилучшие результаты на практике. Это означает, что при обсуждении и выборе НМУ участники должны сначала договориться о соответствующих критериях эффективности и их весовых коэффициентах. Как следствие, существует множество взглядов на НМУ, поскольку они зависят от:

- i) целей (например, сокращение потерь азота, достижение высокой урожайности и применение оптимальных значений эффективности использования азота и/или воды, «затраты — выгоды» на уровне хозяйства, «затраты — выгоды» на уровне общества);
- ii) типа хозяйства (например, пахотное хозяйство, овощеводческое хозяйство, смешанное хозяйство, животноводческое хозяйство);
- iii) социально-экономических условий (например, доступ к рынкам, знания и технологии); и
- iv) условий окружающей среды (например, климат, почва, гидрология).

142. Учитывая эту сложность и признавая различия во мнениях относительно того, какой подход или уровень амбициозности является «наилучшим», варианты в главах IV–VI называются просто «мерами». Эти меры представляют собой действия, направленные на сокращение выбросов или смягчение негативных последствий, или и то, и другое.

## **Г. Выводы и рекомендации**

143. В отношении принципов комплексного устойчивого управления азотом можно сделать следующие выводы:

а) цель комплексного устойчивого управления азотом в сельском хозяйстве заключается в сведении к минимуму потерь азота в окружающую среду и защите здоровья человека, экосистем и климата при одновременном обеспечении достаточного производства продукции растениеводства и животноводства на основе принципов сбалансированного применения удобрений и экономики замкнутого цикла.

Необходимо полностью устранить негативные последствия потерь азота для здоровья человека, экосистемных услуг, биоразнообразия, водных ресурсов и климата;

b) важно понимать драйверы утечек в азотном цикле и процессы преобразований азота. Это лежит в основе понимания того, как интенсификация и региональная специализация сельскохозяйственных систем влияют на оборачиваемость азота. Такое понимание является необходимым условием для разработки эффективной политики в отношении азота по защите воздуха, почвы и воды в целях сохранения здоровья человека, климата и биоразнообразия;

c) закон оптимума, модель «труба с утечкой» (см. рис. III.1 выше) и понимание взаимодействий между азотом и другими элементами являются ключевыми причинами, которые обуславливают необходимость в комплексном управлении азотом;

d) комплексный и устойчивый подход к управлению азотом, основанный на ряде ключевых положений, касающихся цикла азота и управления им, является основой для эффективной политики по снижению выбросов/смягчения последствий и устойчивых методов ведения сельского хозяйства, которые способствуют становлению экономики с замкнутого цикла по азоту;

e) в комплексных подходах к устойчивому управлению используются пять возможных аспектов интеграции (глава III, раздел 1). Эти аспекты можно комбинировать;

f) комплексное и устойчивое управление азотом опирается на пять следующих инструментов, которые можно комбинировать: системный анализ; бюджеты азота; комплексная оценка; диалог и коммуникация между заинтересованными сторонами; и наилучшие методы управления;

g) меры, которые считаются «наилучшими методами управления» для сокращения выбросов и смягчения воздействия, основаны на вышеупомянутых принципах, аспектах и инструментах. Меры часто привязаны к конкретному участку и региону и, таким образом, представляют собой список вариантов, из которого можно составить согласованные пакеты действий.

144. В отношении принципов комплексного устойчивого управления азотом можно вынести следующие рекомендации:

a) меры по комплексному устойчивому управлению азотом должны основываться на аспектах, принципах и инструментах, изложенных в настоящей главе;

b) комплексное устойчивое управление азотом необходимо для содействия достижению многочисленных целей в области устойчивого развития, в том числе связанных со здоровьем человека, продовольствием, водой, климатом и биоразнообразием;

c) хотя главными «управляющими азотом» на местах являются фермеры, которые также несут значительные расходы на меры по сокращению выбросов азота и получают определенные выгоды от этих мер, ответственность за обеспечение комплексного устойчивого управления азотом при справедливом вознаграждении «управляющих азотом» должны нести все субъекты общества в цепочке производства и потребления продовольствия, включая директивные органы и граждан.

## G. Справочная литература

Ahmed, K. and Sánchez-Triana, E. (2008). *Strategic Environmental Assessment for Policies: An Instrument for Good Governance*. World Bank, Washington, DC, USA. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/6461>.

Alcamo, J. and others (2013). *Drawing Down N<sub>2</sub>O to Protect Climate and the Ozone Layer*. A UNEP Synthesis Report (Nairobi: United Nations Environment Programme (UNEP)).

Bittman, S., Dedina, M., Howard, C.M., Oenema, O., Sutton, M.A. (Eds). 2014. *Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen*. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh.

Bleeker, A., Sutton, M., Winiwarter, W., Leip, A. 2013. *Economy-wide nitrogen balances and indicators: Concept and methodology*. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) (Working Party on Environmental Information), ENV/EPOC/WPEI(2012)4/REV1. Paris, France.

Boincean, B., and Dent, D. 2019. *Farming the Black Earth. Sustainable and Climate-Smart Management of Chernozem Soils*. Springer International Publishing. 226 p. doi:10.1007/978-3-030-22533-9.

Bull, K., Hoft, R., Sutton, M.A. 2011. Coordinating European nitrogen policies between directives and international conventions. Chapter 25 in: M.A. Sutton, C.M. Howard, J.W. Erismann, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, H. van Grinsven, B. Grizzetti (Eds.), *The European Nitrogen Assessment* (pp. 585–601). Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Butterbach-Bahl, K., Kiese, R., Liu, C. 2011. Measurements of Biosphere-Atmosphere Exchange of CH<sub>4</sub> in Terrestrial Ecosystems. *Methods in Enzymology* 495, 271–287. doi:10.1016/B978-0-12-386905-0.00018-8.

Butterbach-Bahl, K. and others (2011b). Effect of reactive nitrogen on the European greenhouse balance, in *The European Nitrogen Assessment*, Sutton, M.A. and others, eds., Cambridge, Cambridge University Press.

Cassman, K.G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy Science* 96, 5952–5959.

Cayuela, M.L., Aguilera, E., Sanz-Cobena, A., Adams, D.C., Abalos, D., Barton, L., Ryals, R., Silver, W.L., Alfaro, M.A., Pappa, V.A., Smith, P., Garnier, J., Billen, G., Bouwman, L., Bondeau, A., Lassaletta, L. 2017. Direct nitrous oxide emissions in Mediterranean climate cropping systems: emission factors based on a meta-analysis of available measurement data. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 238, 25–35, doi:10.1016/j.agee.2016.10.006.

Clark, W.C. and others (2016). Boundary work for sustainable development: Natural resource management at the Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR). *Proceedings of the National Academy Science* 113, 4615–4622.

Conley, D.J., Paerl, H.W., Howarth, R.W., Boesch, D.F., Seitzinger, S.P., Havens, K.E., Lancelot, C., Likens, G.E. 2009. Controlling Eutrophication: Nitrogen and Phosphorus. *Science* 323, 1014–1015.

Coskun, D., Britto, D.T., Shi, W, Kronzucker, H.J. 2017. Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition. *Nature Plants* 3, 17074. doi:10.1038/nplants.2017.74.

Dalgaard, T., Olesen, J.E., Misselbrook, T., Gourley, C., Mathias, E., Helsdstab, J., Baklanov, A., Cordovil, C.M.d.S., Sutton, M.A. 2015. *Methane and Ammonia Air Pollution. Policy Brief prepared by the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen*. May 2015. <http://www.clrtap-tfrn.org/>.

De Boer, I.J.M. and van Ittersum, M.K (2018). *Circularity in agricultural production*. Wageningen Wageningen University and Research.

- De Wit, C.T. 1992. Resource Use Efficiency in Agriculture. *Agricultural Systems* 40, 125–151.
- Dragosits, U., Theobald, M.R., Place, C.J., ApSimon, H.M., Sutton, M.A. 2006. The potential for spatial planning at the landscape level to mitigate the effects of atmospheric ammonia deposition. *J. Environ. Sci. and Policy* 9, 626–638.
- EC 2000. EU Water Framework Directive - integrated river basin management for Europe (WFD; 2000/60/EC)  
[http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index\\_en.html](http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html).
- Erisman, J.W. and others (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, vol. 1, No. 10 (September), pp. 636–639.
- Erisman, W.J., Leach, A., Bleeker, A., Atwell, B., Cattaneo, L., Galloway, J. 2018. An integrated approach to a nitrogen use efficiency (NUE) indicator for the food production–consumption chain. *Sustainability* 10(4).
- European Environment Agency (1995). *Europe’s Environment: the Dobbris Assessment*, Copenhagen.
- European Environment Agency (2015). *The European environment — state and outlook. An integrated assessment of the European Environment*, Copenhagen. Available at <http://www.eea.europa.eu/soer-2015>.
- Firestone, M.K., and Davidson, E.A. 1989. Microbiological basis of NO and N<sub>2</sub>O production and consumption in soil. In: Andreae, M.O., and Schimel, D.S. (Eds.) *Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere* (pp. 7–21). John Wiley and Sons, New York, USA.
- Fischer, T. B. 2007. *Theory and Practice of Strategic Environmental Assessment*. Earthscan, London, UK.
- Fowler, D. and others (2013). The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of The Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 368, No. 1621.
- Galloway, J. and others (2003). The nitrogen cascade. *Bioscience*, vol. 53, No. 4 (April), pp. 341–356.
- Galloway, J. N., Dentener, F.J., Capone, D.G., Boyer, E.W., Howarth, R.W., Seitzinger, S.P., Asner, G.P., Cleveland, C.C., Green, P.A., Holland, E.A., Karl, D.M., Michaels, A.F., Porter, J.H., Townsend, A.R., Vöösmary, C.J. 2004. Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry* 70, 153–226.
- Galloway, J.N. and others (2008). Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, vol. 320, No. 5878 (May), pp. 889–892.
- Gerber, P.J. and others 2014. Nutrient use efficiency: a valuable approach to benchmark the sustainability of nutrient use in global livestock production? *Current Opinion in Environmental Sustainability* 9–10, 122–130.
- Godfray, H. C. J. and others (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, vol. 327, No. 5967 (February), pp. 812–818.
- Hanley, N., and Barbier, E.B. 2009. *Pricing Nature: Cost-benefit Analysis and Environmental Policy*. Edward Elgar Publishing limited, UK.
- Hatfield, J.L., and Follett, R.F. 2008. *Nitrogen in the Environment: Sources, Problems and Management*. Elsevier, Academic Press.
- Herridge, D.F., Peoples, M.B., Boddey, R.M. 2008. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant Soil* 311, 1–18. doi:10.1007/s11104-008-9668-3.
- Hristov, A. N., Bannink, A., Crompton, L. A., Huhtanen, P., Kreuzer, M., McGee, M., Nozière, P., Reynolds, C. K., Bayat, A. R., Yáñez-Ruiz, D. R., Dijkstra, J., Kebreab, E., Schwarm, A., Shingfield, K. J., Yu, Z. 2019. Nitrogen in ruminant nutrition: A review of measurement techniques. *Journal of Dairy Science* 102, 5811–5852.

- Jarvis, S., Hutchings, N., Brentrup, F., Olesen, J., Hoek, K. 2011. Nitrogen flows in farming systems across Europe. Chapter 10 in: M.A. Sutton, C.M. Howard, J.W. Erisman, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, H. van Grinsven, B. Grizzetti (Eds.), *The European Nitrogen Assessment* (pp. 211–228). Cambridge University Press, Cambridge, UK. doi:10.1017/CBO9780511976988.
- Jurgilevich, A., and others (2016). Transition towards circular economy in the food system. *Sustainability*, vol. 8, No. 1 (January), art. No. 69.
- Ladha, J.K. and others (2016). Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice, and wheat production systems. *Scientific Reports*, vol. 6 (January), art. No. 19355.
- Lam, S., Suter, H., Mosier, A., Chen, D. 2017. Using nitrification inhibitors to mitigate agricultural N<sub>2</sub>O emission: a double-edged sword? *Global Change Biology* 23 (2), 485–489. doi: 10.1111/gcb.13338.
- Lassaletta, L., and others (2014). Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends. *Biogeochemistry*, vol. 118, pp. 225–241.
- Leip, A., Achermann, B., Billen, G., Bleeker, A., Bouwman, A.F., Vries, W. De, Dragosits, U., Döring, U., Fernall, D., Geupel, M., Herolstab, J., Johnes, P., Christine, A., Gall, L., Monni, S., Nevečeňal, R., Prud, M., Reuter, H.I., Simpson, D., Seufert, G., Sutton, M.A., Aardenne, J. Van, Voß, M., Winiwarter, W. 2011. Integrating nitrogen fluxes at the European scale. Chapter 16 in: M.A. Sutton, C.M. Howard, J.W. Erisman, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, H. van Grinsven, B. Grizzetti (Eds.), *The European Nitrogen Assessment* (pp. 345–376). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Luo, G. J., Brüggemann, N., Wolf, B., Gasche, R., Grote, R., Butterbach-Bahl, K. 2012. Decadal variability of soil CO<sub>2</sub>, NO, N<sub>2</sub>O, and CH<sub>4</sub> fluxes at the Högwald Forest, Germany. *Biogeosciences* 9, 1741–1763, doi.org/10.5194/bg-9-1741-2012.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Elsevier.
- McDonald, P., Edwards, R.A., Greenhalgh, J.F.D., Morgan, C.A., Sinclair, L.A., Wilkinson, R.G. 2010. *Animal Nutrition*. Seventh Edition. Prentice Hall, Pearson, Harlow, England. 714 pp.
- Medinets, S., Skiba, U., Rennenberg, H., Butterbach-Bahl, K. (2015). A review of soil NO transformation: Associated processes and possible physiological significance on organisms. *Soil Biology and Biochemistry* 80, 92–117.
- Medinets, S., Gasche, R., Kiese, R., Rennenberg, H., Butterbach-Bahl, K. 2019. Seasonal dynamics and profiles of soil NO concentrations in a temperate forest. *Plant Soil* 445, 335–348. doi.org/10.1007/s11104-019-04305-5.
- Mueller, N.D., Gerber, J.S., Johnston, M., Ray, D.K., Ramankutty, N., Foley, J.A. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature* 490, 254–257. A Corrigendum to this article was published 2013 in *Nature* 494, 390–390. doi:10.1038/nature11907.
- Norton, J., and Ouyang, Y. 2019. Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils. *Front. Microbiol.* 10, 1931. doi.org/10.3389/fmicb.2019.01931.
- OECD. 2018. *Cost-Benefit Analysis and the Environment. Further Developments and Policy Use*. OECD Publishing, Paris, France. doi.org/10.1787/9789264085169-en.
- Oenema, O., Witzke, H. P., Klimont, Z., Lesschen, J. P., Velthof, G. L. 2009. Integrated assessment of promising measures to decrease nitrogen losses from agriculture in EU-27. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 133, 280–288.
- Oenema, O., and others (2011a). Nitrogen in current European policies, in *The European Nitrogen Assessment; Sources, Effects and Policy Perspectives*, Sutton, M.A. and others, eds. Cambridge, Cambridge University Press.

- Oenema, O. and others (2011b). Developing integrated approaches to nitrogen management, in *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives*, Sutton, M.A. and others, eds. (Cambridge, Cambridge University Press).
- Oenema, O., Ju, X., de Klein, C., Alfaro, M., del Prado, A., Lesschen, J.P., Zheng, X., Velthof, G., Ma, L., Gao, B., Kroeze, C., Sutton, M.A. 2013. Reducing emissions from agricultural sources. Chapter 4, in: Alcamo, J., Leonard, S.A., Ravishankara, A.R., Sutton, M.A. (Eds.), *Drawing Down N<sub>2</sub>O to Protect Climate and the Ozone Layer. A UNEP Synthesis Report* (pp. 17–25). United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- Oenema, O., Billen, G., Lassaletta, L., Brentrup, F., Lammel, J., Bascou, P., Dobermann, A., Erisman, J.W., Garnett, T., Hammel, M., Haniotis, T., Hoxha, A., Jensen, L.S., Oleszek, W., Pallière, C., Powlson, D., Quemada, M., Sutton, M.A., Vallejo, A., Van Grinsven, H.J.M., Winiwarter, W. 2015. Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in food systems. (EU Nitrogen Expert Panel). Wageningen University, The Netherlands.
- Oita, A. (2016). Substantial nitrogen pollution embedded in international trade. *Nature Geoscience*, vol. 9, No. 3 (January), pp. 111–115.
- Quemada, M., and Gabriel, J.L. 2016. Approaches for increasing nitrogen and water use efficiency simultaneously. *Global Food Security* 9, 29–35. doi.org/10.1016/j.gfs.2016.05.004.
- Quemada, M., Lassaletta, L., Jensen, L.S., Godinot, O., Brentrup, F., Buckley, C., Foray, S., Hvid, S.K., Oenema, J., Richards, K.G., Oenema, O. 2020. Exploring nitrogen indicators of farm performance among farm types across several European case studies. *Agricultural Systems* 177, 102689.
- Sanz-Cobena, A, Misselbrook, T., Camp, V., Vallejo, A. 2011. Effect of water addition and the urease inhibitor NBPT on the abatement of ammonia emission from surface applied urea. *Atmospheric Environment* 45, 1517–1524. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.12.051.
- Schlesinger, W., and Bernhardt, E. 2013. *Biogeochemistry*. 3rd Edition. Elsevier, New York. doi:10.1016/B978-0-12-385874-0.09991-X.
- Smil, V. 2004. *Enriching the earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the transformation of world food production*. The MIT Press, Cambridge, MS, USA.
- Sparks, J.P., 2009. Ecological ramifications of the direct foliar uptake of nitrogen. *Oecologia* 159, 1–13.
- Springmann, M., Clark, M., Mason-D’Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B.L., Lassaletta, L., de Vries, W., Vermeulen, S.J., Herrero, M., Carlson, K.M., Jonell, M., Troell, M., DeClerck, F., Gordon, L.J., Zurayk, R., Scarborough, P., Rayner, M., Loken, B., Fanzo, J., Godfray, H.C.J., Tilman, D., Rockström, J., Willett, W. 2018. Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562, 519–525.
- Steffen, W. and others (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, vol. 347, No. 6223 (February).
- Suttle, N.F. 2010. *Mineral Nutrition of Livestock*, 4th Edition. CABI International.
- Sutton, M.A., Schjørring, J.K., Wyers G.P. (1995). Plant - atmosphere exchange of ammonia. *Philosophical Transactions of The Royal Society: Series A*, vol. 351, No. 1696 (May), pp. 261–278.
- Sutton, M.A. and others, eds. (2011). *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Sutton, M.A. and others (2013). *Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution*. Global Overview of Nutrient Management (Edinburgh, Centre of Ecology and Hydrology).
- Sutton, M.A. and others (2019). The Nitrogen Fix: From nitrogen cycle pollution to nitrogen circular economy, in *Frontiers 2018/19: Emerging Issues of Environmental Concern* (Nairobi, United Nations Environment Programme (UNEP)), pp. 52–65.

TFIAM/CIAM, 2007. Review of the Gothenburg Protocol. Report of the Task Force on Integrated Assessment Modelling and the Centre for Integrated Assessment Modelling, Report 1/2007. <https://www.pbl.nl/en/publications/ReviewoftheGothenburgProtocol>.

Thompson, R.L., Lassaletta, L., Patra, P.K., Wilson, C., Wells, K.C., Gressent, A., Koffi, E.N., Chipperfield, M.P., Winiwarter, W., Davidson, E.A., Tian, H., Canadell, J.G. 2019. Acceleration of global N<sub>2</sub>O emissions seen from two decades of atmospheric inversion. *Nature Climate Change* 9, 993–998.

Tuinstra, W., Hordijk, L., Kroeze, C. 2006. Moving boundaries in transboundary air pollution co-production of science and policy under the convention on long range transboundary air pollution. *Global Environ. Change* 16, 349–363. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.03.002.

UNECE 1999. The Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone. United Nations Economic Commission for Europe.

UNECE 2013. Guidance document on national nitrogen budgets. ECE/EB.AIR/119. Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. (Drafted by the Expert Panel on Nitrogen Budgets of the Task Force on Reactive Nitrogen).

UNEP (2019). Colombo Declaration on Sustainable Nitrogen Management. Available at <https://papersmart.unon.org/resolution/sustainable-nitrogen-management> (Accessed 16 April 2020).

Van Gastelen, S., Dijkstra, J., Bannink, A. 2019. Are dietary strategies to mitigate enteric methane emission equally effective across dairy cattle, beef cattle, and sheep? *Journal of Dairy Science* 102, 6109–6130.

Van Groenigen, J.W., van Kessel, C., Hungate, B.A., Oenema, O., Powlson, D.S., van Groenigen, K.J. 2017. Sequestering soil organic carbon: a nitrogen dilemma. *Environmental Science and Technology* 51, 4738–4739.

Van Ittersum, M.K., and Rabbinge, R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research* 52, 197–208.

Vitousek, P.M., and others (1997). Human alterations of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications*, vol. 7, No. 3 (August), pp. 737–750.

Westhoek H., Lesschen, J.P., Rood, T., Leip, A., Wagner, S., De Marco, A., Murphy-Bokern, D., Pallière, C., Howard, C.M., Oenema O., Sutton, M.A. 2015. Nitrogen on the Table: The influence of food choices on nitrogen emissions and the European environment. (European Nitrogen Assessment Special Report on Nitrogen and Food). Centre for Ecology and Hydrology, UK. 67 pp.

Zhang, X., Davidson, E.A., Zou, T., Lassaletta, L., Quan, Z., Li, T., Zhang, W. 2020. Quantifying nutrient budgets for sustainable nutrient management. *Global Biogeochemical Cycles* 34 (3), e2018GB006060.

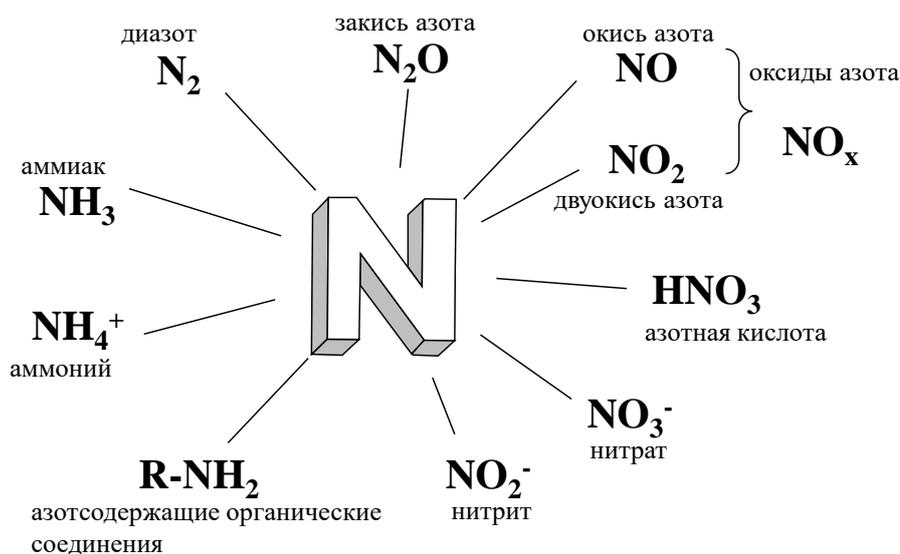
## IV. Содержание сельскохозяйственных животных в помещении, хранение и переработка навоза

### A. Введение и справочная информация

145. Азот (N) существует в различных формах (см. рис. IV.1 ниже), включая диазот ( $N_2$ ) и широкий спектр реактивных форм ( $N_r$ ), в частности все биологически, фотохимически и радиационно активные формы азота. Реактивные азотсодержащие соединения — это такие соединения, как аммиак ( $NH_3$ ) и аммоний ( $NH_4^+$ ), закись азота ( $N_2O$ ), оксиды азота ( $NO_x$ )<sup>14</sup>, нитриты ( $NO_2^-$ ), нитраты ( $NO_3^-$ ), азотная кислота ( $HNO_3$ ) и широкий спектр азотсодержащих органических соединений ( $R-NH_2$ ). Реактивные формы азота способны распространяться в окружающей среде и вызывать смог, кислотные дожди, утрату биоразнообразия и др.<sup>15</sup>, а также оказывают воздействие на климат (Butterbach-Bahl and others, 2011b). Для разработки мер по борьбе с загрязнением/смягчению последствий необходимо глубокое знание процессов, влияющих на образование и выброс всех реактивных форм и диазота в окружающую среду, где он распространяется по самым различным атмосферным и водным путям.

Рис. IV.1

Основные формы азота, встречающиеся в окружающей среде

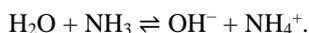


*Источник:* данный рисунок подготовлен для настоящего документа.

*Примечание:* все формы азота, за исключением  $N_2$ , часто объединяются названием связанный азот или реактивные формы азота ( $N_r$ ).

#### Аммиак

146. Реакции, посредством которых образуется аммиак, и факторы, воздействующие на этот процесс, хорошо известны. В результате разложения азотсодержащих органических соединений образуется аммоний. Аммоний находится в равновесии с аммиаком. Степень концентрации ионов аммония, образующихся от аммиака, зависит от значения pH раствора. При низком pH равновесие смещается вправо: в ионы аммония преобразуется большее количество молекул аммиака. При высоком pH равновесие смещается влево: ион гидроксида присоединяет протон иона аммония, в результате чего образуется аммиак. Этот процесс описывает уравнение:



<sup>14</sup> См. сноску 2.

<sup>15</sup> См. URL: <http://www.n-print.org/node/5>.

147. Выбросы аммиака зависят от разницы между парциальным давлением  $\text{NH}_3$  в растворе и свободного  $\text{NH}_3$  в атмосфере. Высокие концентрации  $\text{NH}_3$  в растворе и низкие концентрации  $\text{NH}_3$  в окружающей атмосфере приводят к увеличению выбросов  $\text{NH}_3$ . Согласно закону Генри, выбросы аммиака также зависят от температуры: повышение температуры приводит к увеличению выбросов (см. рис. IV.2 ниже). В Denmead and others (1982) приводится следующее уравнение:

$$\text{NH}_3 \text{ (в растворе)} = (\text{NH}_3 \text{ (в растворе)} + \text{NH}_4^+ \text{ (в растворе)}) / (1 + 100.09018 + (2729.92/T) - \text{pH}),$$

где

$\text{NH}_3$  (в растворе) = концентрация  $\text{NH}_3$  в растворе

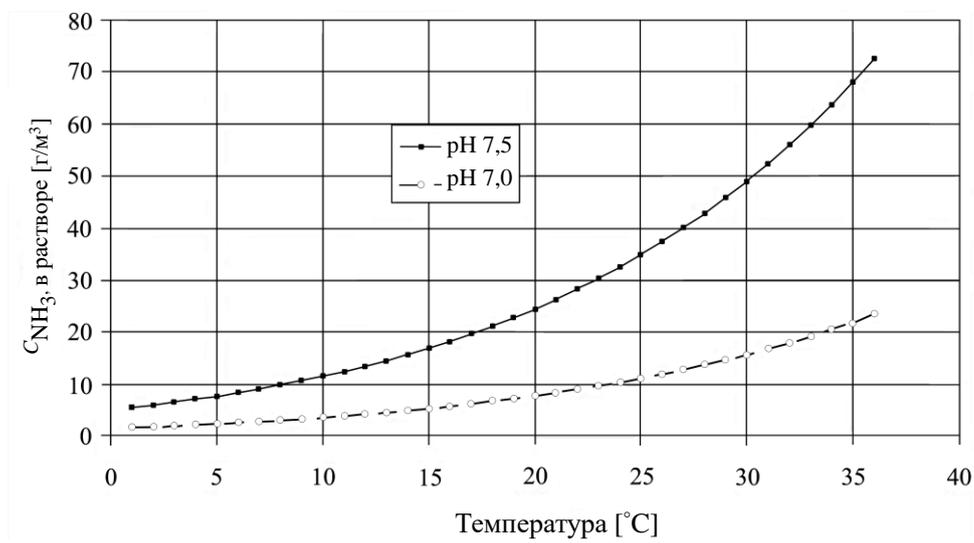
$\text{NH}_3$  (в растворе) +  $\text{NH}_4^+$  (в растворе) = сумма  $\text{NH}_3$  и  $\text{NH}_4^+$  в растворе

T = температура в растворе [K]

pH = значение pH в растворе

Рис. IV.2

**Концентрация  $\text{NH}_3$  в растворе как функция температуры для pH 7,0 и pH 7,5 при постоянном значении  $\text{NH}_4^+$  в растворе**



Источник: по материалам Denmead and others (1982).

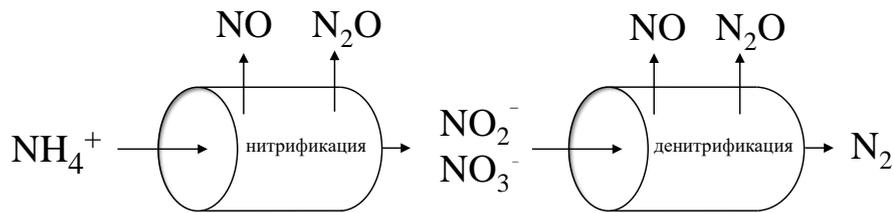
148. Выбросы аммиака в процессе содержания животных в животноводческих помещениях, хранения и переработки навоза образуются в результате разложения мочевины под воздействием вездесущего фермента уреазы с образованием  $\text{NH}_4^+$ . Мочевина выделяется в основном в моче и после гидролиза гораздо более подвержена реакциям с потерями аммиака, чем органический азот, выделяемый в экскрементах. В птицеводстве азот выделяется в основном в виде мочевой кислоты, которая в процессе гидролиза, как и мочевина, преобразуется в аммиак. В случае возможности высушивания помета (например, в подстилке для птицы) можно выбирать стратегии, направленные на снижение скорости гидролиза мочевой кислоты и мочевины. В связи с образованием аммиачного азота (сумма  $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$ ) в стратегиях содержания животных и уборки, хранения и использования навоза предусматриваются немедленные меры по предотвращению его улетучивания в атмосферу, например уменьшение доступа воздуха, снижение pH или поддержание прохладной температуры на поверхности навоза (см. рис. IV.2 выше).

#### Закись азота и диазот

149. Газы  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$  образуются как в процессе нитрификации, так и в процессе денитрификации, происходящих в окружающей среде. В модели «труба с утечкой», предложенной в Firestone and Davidson (1989) потери  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{NO}_x$  показаны как потоки утечек при нитрификации и денитрификации (рис. IV.3).

Рис. IV.3

**Модель «труба с утечкой» для потерь  $N_2O$  и  $NO_x$  при нитрификации и денитрификации**



Источник: по материалам Firestone and Davidson (1989).

150. В процессе нитрификации аммоний окисляется до нитрита, а затем до нитрата. Этот процесс является сугубо аэробным. Автотрофные нитрифицирующие бактерии относятся к широко распространенным родам бактерий *Nitrosomonas*, *Nitrospira* и *Nitrobacter*, способным расти на углекислом газе ( $CO_2$ ), кислороде ( $O_2$ ) и  $NH_4^+$ . Доступность  $NH_4^+$  по большей мере является ограничивающим фактором, в то время как  $CO_2$  и  $O_2$  доступны в большом количестве. При низком pH, отсутствии фосфора (P) и температурах ниже  $5\text{ }^\circ C$  или выше  $40\text{ }^\circ C$  нитрификация идет менее активно. Оптимальное для процесса нитрификации содержание воды в почве — около 60 % ее водоудерживающей способности.

151. При низких значениях pH нитрификация осуществляется бактериями и грибами. В отличие от автотрофных нитрификаторов, для роста им необходим углерод. Интенсивность круговорота в результате их деятельности значительно ниже по сравнению с автотрофными нитрификаторами, вместе с тем к гетеротрофной нитрификации способен более широкий круг видов, что все же позволяет достигнуть существенного суммарного круговорота. Образовавшийся в процессе нитрификации  $N_2O$  составляет около 1 %, а образование  $NO_x$  варьирует от 1 % до 4 % вводимого азота (Butterbach-Bahl and others, 2011a).

152. В процессе денитрификации нитраты ( $NO_3^-$ ) преобразуются в нитриты ( $NO_2^-$ ),  $NO_x$ ,  $N_2O$  или  $N_2$  при низкой доступности кислорода.  $NO_3^-$ ,  $NO_x$  и  $N_2O$  выступают как альтернативные акцепторы электронов в отсутствие  $O_2$ , поэтому денитрификация происходит только в строго анаэробных условиях. Молекулярный азот является конечным продуктом цепи реакций процесса денитрификации и это единственный биологический процесс, в результате которого реактивные соединения азота могут преобразовываться в неактивный молекулярный азот. Денитрифицирующие бактерии являются гетеротрофами и факультативными анаэробами. То есть они используют в качестве акцептора электронов  $O_2$ , а при низкой доступности кислорода переключаются на альтернативные акцепторы ( $NO_3^-$ ,  $NO_x$  и  $N_2O$ ). Существует большое количество видов денитрифицирующих бактерий, и они широко распространены.

153. Факторы, контролирующие процесс денитрификации, подробно изучены, в основном в лабораторных условиях. Различные факторы вступают между собой в сложное взаимодействие, что на практике затрудняет прогноз фактических выбросов  $N_2O$  во времени и пространстве.

154. Основным фактором, влияющим на процесс денитрификации, является доступность кислорода. Процесс денитрификации запускается при концентрации  $O_2$  ниже 5 % (например, Hutchinson and Davidson, 1993). Подобное снижение может наблюдаться в плохо аэрируемых почвах (например, при высокой степени увлажнения — выше 80 % заполнения водой порового пространства), а также в почвах, где в результате активного круговорота веществ потребление кислорода опережает его поступление. Наличие легко разлагающихся источников углерода (C) и высокие концентрации нитратов также увеличивают скорость денитрификации,

в то время как низкая температура и низкое значение pH снижают активность этого процесса.

155. Соотношение между образованием  $N_2$  и  $N_2O$  в основном регулируется соотношением между акцептором электронов и химическим восстановителем, а также концентрацией  $O_2$  в субстрате.  $N_2$  образуется только в строго анаэробных условиях и при широком диапазоне соотношения C:NO<sub>3</sub>. Высокие концентрации нитратов ускоряют темпы образования  $N_2O$ . Такие различия имеют практические последствия в части потерь азота при содержании сельскохозяйственных животных в помещениях и хранении навоза, в зависимости от степени доступности кислорода и углерода в различных системах.

#### **Выщелачивание и сток нитратов и других азотсодержащих веществ**

156. Такая проблема, как диффузное загрязнение грунтовых и поверхностных вод азотом (и фосфором), актуальна для многих регионов мира, особенно для районов с высоким поголовьем сельскохозяйственных животных. Навоз содержит значительные количества органики, азота и фосфора, потери которых могут происходить в случае неправильного обращения при стойловом содержании скота, в процессе хранения навоза или после внесения навоза в почву.

157. Азот и органические вещества попадают в водные системы главным образом в результате вымывания через почвенные горизонты и поверхностных стоков в случае превышения инфильтрационной способности грунтов. Серьезный ущерб окружающей среде также могут наносить выбросы из точечных источников, например в случае утечки жидкого навоза. В поверхностных водах потери приводят к таким проблемам, как эвтрофикация и цветение водорослей, а в районах, где добываются подземные воды, высокие концентрации нитратов могут ухудшить качество питьевой воды. В Европейском союзе для питьевой воды установлен предел концентрации нитратов ( $NO_3^-$ ) на уровне 50 мг/л (см. Директиву Европейского союза по питьевой воде)<sup>16</sup>. Азот, попадающий в результате выщелачивания в поверхностные воды, может также стать источником выбросов закиси азота, обладающей мощным парниковым эффектом. Кроме того, существенная потеря азотных ресурсов приводит к экономическим издержкам для сельскохозяйственных производителей, а при производстве азотных удобрений потребляются значительные объемы ископаемого топлива, что приводит к выбросу парниковых газов и другим загрязняющим окружающую среду выбросам. Поэтому надлежащее обращение с навозом и его использование крайне важны для того, чтобы свести к минимуму вымывание питательных веществ и воздействие сельского хозяйства на окружающую среду.

#### **Учет потоков азота**

158. Меры по уменьшению потерь азота в процессе кормления, при содержании сельскохозяйственных животных в помещениях и в ходе переработки навоза необходимо рассматривать в увязке с другими мерами, описанными в настоящем руководящем документе. «Управление навозом — это непрерывный процесс, включающий в себя как его образование, так и хранение и обработку и, наконец, внесение в почву» (Chadwick and others, 2011). Соответственно на каждой стадии этого единого процесса существует вероятность потерь азота, углерода и фосфора. Для оценки выбросов  $NH_3$  в ходе процесса управления навозом в Webb and Misselbrook (2004) был использован подход «массового потока». Этот подход позволяет учитывать воздействие принятых на одном из этапов мер по сокращению выбросов и удержанию азота в навозе на других этапах непрерывного процесса. Аналогичным образом, другие газообразные потери азота, включая  $N_2O$ ,  $NO_x$  и  $N_2$ , могут быть оценены при помощи подхода массового потока примерно так же, как это было сделано в Dämmgen and Hutchings (2008). Подобный системный подход важен потому, что позволяет учитывать воздействие методов борьбы с загрязнением, примененных на одном этапе,

<sup>16</sup> Директива 98/83/ЕС Совета от 3 ноября 1998 года о качестве воды, предназначенной для употребления людьми, *Official Journal of the European Communities*, L 330 (1998), сс. 32–58.

на последующих этапах (Sommer and others, 2009; 2013), включая потери азота, попадающие в воду в результате выщелачивания и в виде стоков.

## **В. Подход к описанию мер по борьбе с загрязнением**

159. В следующих разделах представлены основные управленческие методы и меры по борьбе с загрязнением/смягчению его последствий, которые повлияют на использование азота и его потери при содержании сельскохозяйственных животных в помещениях, хранении навоза, обработке и переработке навоза. Некоторые меры воздействуют на все формы потерь азота, а другие могут смягчить последствия потерь азота в отдельной форме, оказывая незначительное или негативное воздействие на потери азота в других формах. Эффективность борьбы с загрязнением окружающей среды можно повысить путем комбинированного осуществления определенных комплексов мер.

160. После описания каждой меры в таблице (см. таблицы IV.1–IV.23 и IV.25–IV.40 ниже) для каждой формы потери азота приводятся категория ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления (с использованием подхода ECE/EB.AIR/120; Bittman and others, 2014)<sup>17</sup> и степень воздействия каждой меры. Представлены экспертные заключения по улетучиванию NH<sub>3</sub>, потерям в форме N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub> и N<sub>2</sub>, стокам и выщелачиванию в форме NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, а также по общим потерям азота.

161. Если делается вывод о том, что мера приводит к увеличению потерь азота в той или иной форме, то она по определению также относится к категории 3 для данной формы азота. Степень воздействия той или иной меры может рассматриваться как показатель ее «эффективности», а не того, в какой степени эта мера «применима» в различных контекстах. Если необходимо разъяснение, степень воздействия той или иной меры описывается в сравнении с конкретной типовой системой. Например, в случае содержания сельскохозяйственных животных в помещениях включается кормление *ad libitum* (по желанию), а также хранение жидкого навоза без покрытия и гидроизолированного основания. В некоторых частях региона ЕЭК ООН отдельные типовые системы могут быть запрещены, например по причине уровней загрязнения, которыми сопровождается их использование.

## **С. Кормление сельскохозяйственных животных**

162. Содержание сырого протеина (СП) и состав кормов животных являются основными факторами, влияющими на выделение мочи. Избыток сырого протеина, не усваиваемого животным, выделяется с экскретом и может быть легко потерян в цепочке операций по управлению навозом. Поэтому первой и самой эффективной мерой по снижению выбросов азота является адаптация содержания сырого протеина в рационе к потребностям животного. Эта мера позволяет сократить потери азота во всех формах (см. рис. II.1 выше), поскольку в результате снижается его содержание в экскретах. Поскольку эффективность использования азота (ЭИА) для каждого отдельного животного в силу естественных причин сильно дифференцирована, одним из путей может стать целевая селекция для повышения ЭИА.

163. Сокращение СП в кормах животных является одним из наиболее экономически эффективных способов сокращения выбросов азота во всей цепочке управления навозом. На каждый процент (в абсолютных цифрах) снижения содержания протеина в рационе животных выбросы NH<sub>3</sub> в ходе содержания животных в животноводческих помещениях, хранения и внесения навоза снижаются на 5–15 % (данное значение зависит также от pH мочи и экскрементов). Низкопротеиновый рацион позволяет также сократить выбросы N<sub>2</sub>O и повысить эффективность использования азота

<sup>17</sup> Описание категорий ЕЭК ООН и подхода к представлению степени воздействия см. в п. 16 главы I настоящего документа.

в животноводстве. Потенциальная отрицательная корреляция с выбросами  $\text{CH}_4$  в результате энтеральной ферментации еще полностью не изучена и нуждается в оценке. Однако эффективное использование азота является решающим фактором в экологически чистом молочном производстве. Кроме того, никаких последствий для здоровья или благополучия животных уменьшение содержания протеина в рационе не имеет, при условии обеспечения потребностей во всех аминокислотах.

164. Низкопротеиновый рацион в большей степени применим к животным на стойловом содержании. В свободно-выпасных системах он применим в меньшей степени, поскольку животные съедают траву на ранней стадии физиологического роста, на которой она обычно отличается высоким содержанием разлагаемого протеина. Следует отметить, что на лугопастбищных угодьях, на которых произрастают бобовые (например, клевер, люцерна), растительность также имеет относительно высокое содержание протеина, что может приводить к избытку азота в рационе питания скота. Стратегии снижения содержания протеина в травах включают в себя: сбалансированное внесение азотных удобрений; выпас/заготовку кормов на более поздней стадии физиологического роста и т. д.; изменение рациона при пастбищном содержании, например подкормка скота кормами с низким содержанием протеина.

## 1. Молочный и мясной скот

### Кормление животных — мера 1: Адаптация потребления протеина в рационе питания (молочный и мясной скот)

165. Уменьшение содержания сырого протеина (СП) в рационе жвачных животных является эффективной стратегией снижения  $\text{NH}_3$  и общих потерь азота. Применимы следующие руководящие принципы:

a) среднее содержание СП в рационе питания молочного скота не должно превышать 15–16 % в сухом веществе (СВ) (Broderick, 2003; Swensson, 2003). Для мясного скота в возрасте более шести месяцев этот показатель может быть сокращен еще больше, до 12 %;

b) кормление по фазам может вводиться таким образом, чтобы содержание СП в рационе молочных коров постепенно снижалось с 16 % в СВ непосредственно перед отелом и в ранней фазе лактации до менее 14 % в поздней фазе лактации и в течение основной части сухостойного периода;

c) кормление по фазам также может применяться в случае мясного скота с постепенным снижением СП в рационе с 16 % до 12 % на протяжении определенного периода времени. Более подробная информация и данные о сопутствующих затратах приводятся в оценке затрат ЦГБА (Chapter 3.4 «Low nitrogen feeding strategies in dairy cattle» (Глава 3.4 «Стратегии кормления на основе рациона с низким содержанием азота для молочного скота») в Reis and others, 2015).

166. В целом увеличение соотношения энергия/протеин в рационе путем использования более «старой» травы (более высокий травостой) или валков фуражного сена и/или дополнения травы высокоэнергетическими кормами (например, кукурузный силос) хорошо зарекомендовало себя в качестве стратегии снижения уровня сырого протеина. Однако в пастбищных системах содержания жвачных животных осуществить эти стратегии сложнее, так как кормление старой травой может привести к снижению качества рациона, особенно если окружающие условия неблагоприятны для выращивания высокоэнергетических кормов (например, теплый климат), которые в таком случае придется закупать. Следовательно, полное использование растущей травы больше не может быть гарантировано. Кроме того, в отсутствие других мер такая стратегия может также привести к увеличению выбросов метана.

167. Во многих частях мира разведение крупного рогатого скота опирается на системы полного или частичного пастбищного содержания. В таких системах значительную часть рациона питания составляют трава и заготовленные из нее продукты с высоким содержанием протеинов, что затрудняет достижение целевых

значений по СП, учитывая их высокое содержание в траве с культурных пастбищ. Содержание СП в свежей траве на этапе выпаса (2000–2500 кг СВ/га) часто достигает 18 % — 20 % (или даже выше, особенно при наличии бобовых), в то время как в травяном силосе это значение колеблется от 16 % до 18 %, а в сене — от 12 % до 15 % (например, Whitehead, 2000). В кукурузном силосе, в свою очередь, содержится всего 7–8 % СП. Таким образом, рацион питания, в основе которого лежит трава, часто характеризуется избытком белка, а то, насколько высокими будут выделения азота в таком случае, зависит в значительной степени от пропорции травы, травяного силоса и сена в рационе, а также от содержания белка в этих кормах. Избыток белка и соответствующие экскреция и потери азота будут самыми высокими при летнем рационе исключительно на базе травы (или травы и бобовых) при выпасе на интенсивно удобряемых пастбищах с молодым травостоем или сочетания трав и бобовых.

168. Мочевые выделения пасущихся животных, как правило, просачиваются в почву. Это означает, что выбросы  $NH_3$  в расчете на одно животное сокращаются за счет продления периодов выпаса по сравнению с временем стойлового содержания, при котором экскременты собираются, хранятся и вносятся в почву. Следует отметить, что выпас скота может приводить к увеличению выбросов других форм азота (например, выщелачивание азота в форме нитратов и выбросы  $N_2O$ ). Однако, учитывая явное и легко поддающееся количественной оценке воздействие на выбросы  $NH_3$ , увеличение периода, в течение которого животные пасутся в течение всего дня, может рассматриваться как одна из стратегий сокращения выбросов (см. главу III, полевая мера 18).

Таблица IV.1

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 1 в области кормления**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	1	3 <sup>a</sup>	1	2	1–2
Степень воздействия	↓↓	~ ↓↓	? <sup>a</sup>	↓↓	↓↓	↓↓ <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Эта мера предположительно позволит сократить выбросы  $NO_x$ , однако данное предположение должно быть подтверждено экспериментальными данными.

<sup>b</sup> Поскольку благодаря этой мере уменьшается общее количество вводимого азота, она может содействовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет снижения потерь  $N_f$  и  $N_2$  в более широком плане.

### **Кормление животных — мера 2: Повышение продуктивности (молочный и мясной скот)**

169. В целом повышение молочной или мясной продуктивности молочного скота может привести к снижению выбросов на единицу продукции животноводства. Оптимизация продуктивности также приведет к сокращению энтеральных выбросов метана. Вместе с тем оптимальный уровень продуктивности варьирует в зависимости от породы и региона; кроме того, необходимо учитывать тот факт, что доля концентратов в рационе питания жвачных животных не может превышать определенный уровень, а для сохранения их здоровья в рационе питания должно присутствовать достаточно грубых кормов.

Таблица IV.2

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 2 в области кормления**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	2	2	3 <sup>a</sup>	2	2	2
Степень воздействия	↓	~ — ↓	? <sup>a</sup>	—	↓	↓ <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Эта мера предположительно позволит сократить выбросы  $NO_x$ , однако данное предположение должно быть подтверждено экспериментальными данными.

<sup>b</sup> Поскольку благодаря этой мере уменьшается общее количество вводимого азота, она может содействовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет снижения потерь  $N_f$  и  $N_2$  в более широком плане.

**Кормление животных — мера 3: Увеличение цикла жизни (молочный скот)**

170. Продуктивность может быть повышена путем увеличения объема производимого молока в год, а также за счет увеличения количества молочных циклов на одно животное. Оптимизированный рацион и условия содержания позволяют увеличить продолжительность цикла жизни молочного скота. В таком случае уменьшается количество молодняка, необходимого для замещения. Также определенную роль могут сыграть снижение эндемических заболеваний и повышение генетической ценности за счет целевой селекции.

Таблица IV.3

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 3 в области кормления**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	2	2	3 <sup>a</sup>	2	2	2
Степень воздействия	↓	~ — ↓	? <sup>a</sup>	—	↓	↓ <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Эта мера предположительно позволит сократить выбросы  $NO_x$ , однако данное предположение должно быть подтверждено экспериментальными данными.

<sup>b</sup> Поскольку благодаря этой мере уменьшается общее количество вводимого азота, она может содействовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет снижения потерь  $N_f$  и  $N_2$  в более широком плане.

**2. Свиньи**

**Кормление животных — мера 4: Адаптация содержания протеина в рационе (свиньи)**

171. В свиноводстве меры по адаптации кормления включают в себя: фазовое кормление; рацион питания на базе легко усваиваемых/доступных питательных веществ; низкопротеиновый рацион с введением добавок аминокислот и кормовых/пищевых добавок. В настоящее время изучаются и другие методы (например, использование разных кормов для самцов (хряков и боровов) и самок), которые, возможно, станут применимы в будущем.

172. Содержание сырого протеина (СП) в рационе свиней можно уменьшить благодаря оптимизации содержания в кормах аминокислот путем добавления синтетических аминокислот (например, лизина, метионина, треонина, триптофана, т. е. лимитирующих аминокислот, содержание которых в обычном рационе на основе зерновых слишком мало) или специальных кормовых компонентов, используя наилучшую доступную информацию об «идеальном протеине» в сочетании с

введением добавок в рацион питания. В Lassaletta and others (2019) проведен общий анализ систем свиноводства, в частности включающий моделирование изменений в содержании СП. Более подробная информация и данные о сопутствующих затратах приводятся в оценке затрат ЦГБА (Chapter 3.2 «Low nitrogen feeding strategies in pigs» (Глава 3.2 «Стратегии кормления на основе рациона с низким содержанием азота для свиней») в Reis and others, 2015).

173. В зависимости от категории свиноводства и исходной ситуации содержание СП в корме может быть снижено на 2–3 % (Canh and others, 1998). Как показали исследования, снижение содержания СП в рационе откормочных свиней на 1 % приводит к уменьшению содержания общего аммиачного азота (TAN) в жидком свином навозе на 10 % и к снижению выбросов NH<sub>3</sub> на 10 % (Canh and others, 1998). Дополнительной мерой, снижающей зависимость от импорта кормов, является включение в кормовые рационы переработанных пищевых отходов или отходов технических производств с контролируемым соотношением энергия/протеин. Эта мера также позволяет сократить выбросы N<sub>r</sub> на более раннем этапе в процессе производства кормов и на более позднем этапе в процессе утилизации отходов (Lassaletta and others, 2019; zu Ermgassen and others, 2016).

Таблица IV.4

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 4 в области кормления**

Форма азота	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Общие	
					N <sub>2</sub>	потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	1	3 <sup>a</sup>	1	2	1
Степень воздействия	↓↓	↓↓	? <sup>a</sup>	↓↓	↓↓	↓↓ <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Эта мера предположительно позволит сократить выбросы NO<sub>x</sub>, однако данное предположение должно быть подтверждено экспериментальными данными.

<sup>b</sup> Поскольку благодаря этой мере уменьшается общее количество вводимого азота, она может содействовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет снижения потерь N<sub>r</sub> и N<sub>2</sub> в более широком плане.

### 3. Птица

#### Кормление животных — мера 5: Адаптация содержания протеина в рационе (птица)

174. Для птицеводства потенциал сокращения выхода азота путем мер по адаптации кормления не так велик, как в случае свиноводства, поскольку на сегодняшний день в среднем уже достигается высокая эффективность трансформации, а вариабельность внутри стаи птиц выше. В зависимости от породы и исходной ситуации содержание СП может быть уменьшено на 1–2 %, однако эта мера уже широко используется производителями на этапах «рост» и «финиш». В настоящее время в государствах — членах Европейского союза и в Северной Америке ведутся дальнейшие прикладные исследования в области питания, что может открыть новые возможности для сокращения выхода азота в будущем.

Таблица IV.5

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 5 в области кормления**

Форма азота	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Общие	
					N <sub>2</sub> потери азота	
Категория ЕЭК ООН	1	1	3 <sup>a</sup>	1	2	1
Степень воздействия	↓↓	↓↓	? <sup>a</sup>	↓↓	↓↓	↓↓ <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Эта мера предположительно позволит сократить выбросы NO<sub>x</sub>, однако данное предположение должно быть подтверждено экспериментальными данными.

<sup>b</sup> Поскольку благодаря этой мере уменьшается общее количество вводимого азота, она может содействовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет снижения потерь N<sub>1</sub> и N<sub>2</sub> в более широком плане.

## D. Содержание сельскохозяйственных животных в помещениях

### 1. Стойловое содержание крупного рогатого скота

175. При принятии мер по снижению выбросов из животноводческих помещений для всех типов животных важно свести к минимуму потери запасенного азота при дальнейшем обращении с навозом, его хранении и внесении в почву, с тем чтобы максимально повысить эффективность затрат на борьбу с выбросами.

176. В регионе ЕЭК ООН применяются различные системы стойлового содержания крупного рогатого скота. Наиболее широко применяется беспривязное содержание, однако в ряде стран по-прежнему практикуется привязное содержание молочного скота. При привязной системе содержания экскременты собираются полностью или частично в виде жидкого навоза. В системах с образованием твердого навоза (например, при использовании соломы) удаление из помещения может производиться ежедневно или в конце сезона, например при содержании животных на глубокой подстилке. Наиболее исследована система боксового содержания молочных коров, в которой большой объем выбросов NH<sub>3</sub> образуется в результате загрязнения щелевых или сплошных полов, а также накопления навоза в навозосборниках и каналах, расположенных под щелевыми полами. Исследований по измерению выбросов NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O и N<sub>2</sub> при стойловом содержании крупного рогатого скота проведено гораздо меньше, поэтому в ряде случаев рекомендации приходится основывать на общих принципах и даются они с меньшей степенью определенности, чем в отношении выбросов NH<sub>3</sub> от таких систем.

177. Поскольку помещения для содержания крупного рогатого скота полы обычно каменные или бетонные, прямого нитратного выщелачивания происходить не должно, если полы не имеют трещин из-за некачественной технической эксплуатации. В случае ненадлежащего дренирования и отвода навозных стоков в навозоприемник (например, в случае подтопления), могут иметь место стоки, содержащие соединения N<sub>1</sub>, из помещений для содержания скота.

178. Хотя площадки с твердым покрытием (как правило, забетонированные территории, примыкающие к зданию молочного хозяйства) являются значительным источником выбросов аммиака за пределами помещений для содержания животных, в некоторых частях региона ЕЭК ООН крупный рогатый скот содержится во внешних огороженных загонах (например, на откормочных площадках), где могут иметь место значительные потери азота в форме выщелачивания N<sub>1</sub>, стоков и газообразных потерь.

179. Из-за соображений заботы о благополучии животных зачастую увеличивается загрязненная площадь выгула на голову скота и повышается интенсивность вентиляции, что приводит к общему увеличению выбросов. Таким образом, изменения в требованиях к проектированию зданий в соответствии с новыми нормами в части обеспечения благополучия животных, введенными в некоторых странах (например, переход от привязного содержания к беспривязно-боксовому), приведут к увеличению

выбросов  $\text{NH}_3$ , если только одновременно с этим не будут приняты соответствующие меры по борьбе с таким увеличением.

180. Системы с образованием твердого навоза по сравнению с жидким навозом: маловероятно, что в системах содержания крупного рогатого скота с использованием соломы и образованием твердого навоза в помещениях для содержания животных будет выделяться меньше  $\text{NH}_3$ , чем в системах с образованием жидкого навоза. Кроме того, потери  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$  в результате (де)нитрификации в системах при содержании на подстилке, как правило, превышают аналогичные потери в системах с образованием жидкого навоза.

181. Хотя выбросы  $\text{NH}_3$  при внесении в почву твердого навоза, содержащего солому, могут быть меньше, чем при внесении жидкого навоза (см., например, Powell and others, 2008), для жидкого навоза имеется больше методов заделки с низким уровнем выбросов.

182. Варианты борьбы с загрязнением при содержании крупного рогатого скота в помещениях могут быть объединены в следующие группы:

- a) системы на основе удаления навоза с пола с применением различных технологий (включая скреперные установки и роботизированные системы уборки);
- b) системы содержания на подстилке (использование альтернативных органических материалов);
- c) методы накопления жидкого навоза в приемнике;
- d) технологии, связанные с кондиционированием воздуха в помещениях;
- e) технологии, используемые в конце производственного процесса, (гибридная вентиляция + методы очистки воздуха) и методы борьбы с выбросами ПГ/смягчения последствий из воздействия.

183. Для дальнейшей оптимизации существующих и разработки новых методов борьбы с загрязнением можно определить несколько путей. В этом контексте методы сокращения выбросов при содержании животных в помещениях должны быть направлены на то, чтобы воздействовать на один или несколько из перечисленных ниже ключевых факторов и/или драйверов, определяющих объем выбросов азота:

- a) дренажная способность полов для прямого стока мочи в навозохранилище;
- b) время нахождения источников мочи/навоза открытыми;
- c) площадь открытых источников мочи/навоза, с которой происходят выбросы;
- d) активность уреазы в лужах мочи;
- e) температура и pH мочи/навоза (см. меры в отношении содержания в помещении 6 и 8 соответственно);
- f) температура воздуха в помещении;
- g) скорости воздуха на поверхностях, с которых происходят выбросы (лужи мочи и поверхность навоза в навозоприемнике);
- h) воздухообмен между свободным пространством накопительной ямы и воздухом в помещении;
- i) отвод воздуха из помещения.

#### **Содержание животных — мера 1: Немедленное разделение мочи и фекалий (крупный рогатый скот)**

184. Физическое сепарирование (например, отдельное хранение) фекалий, содержащих уреазу, и мочи в системах содержания животных в помещениях позволяет замедлить гидролиз мочевины, что в свою очередь приводит к сокращению выбросов как в период нахождения животных в помещении, так и во время внесения навоза

(Burton, 2007; Fangueiro and others, 2008a, 2008b; Møller and others, 2007). Как подкисление, так и щелочение отделенной в месте ее образования мочи надежно подавляет процесс гидролиза мочевины. Длительность периода инактивации может быть скорректирована дозировкой кислоты или щелочи (VDLUFA 2019).

185. При проверке на предмет сокращения выбросов  $\text{NH}_3$  в результате перехода на систему с образованием твердого навоза в сравнении с системой с образованием жидкого навоза, а также в результате разделения твердой и жидкой фракций необходимо учитывать все этапы, на которых происходят выбросы (содержание в помещении, хранение и внесение в почву). Можно рассчитывать на дополнительные положительные результаты сепарирования твердой и жидкой фракций также во время внесения в почву: поскольку в моче (содержащей большую часть доступного аммиачного азота) меньше сухого вещества, чем в жидком навозе, она быстрее просачивается в почву, что снижает выбросы  $\text{NH}_3$ . Твердый навоз не просачивается в почву, однако в нем присутствуют в основном органические соединения азота, и в этом случае выбросы  $\text{NH}_3$  гораздо ниже. О воздействии разделения твердой и жидкой фракций на выбросы  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2$  и нитратное выщелачивание известно меньше, однако серьезных отрицательных последствий здесь не ожидается.

Таблица IV.6

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 1 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	3	3	3	3	2
Степень воздействия	↓↓	?	?	?	?	↓

<sup>a</sup> Немедленное разделение мочи и фекалий, как и увеличение времени выпаса, позволяет значительно сократить выбросы  $\text{NH}_3$  (категория 1). Разделение ранее смешанного жидкого навоза на последующих этапах считается менее эффективным (категория 2) (см. Bittman and others, 2014, para. 159).

**Содержание животных — мера 2: Регулярная уборка полов в животноводческих помещениях скреперными установками с зубчатыми скребками (крупный рогатый скот)**

186. Устройство полов со сточными желобами в помещениях для молочного и мясного скота и очистка таких полов при помощи «зубчатых» скребков зарекомендовали себя как надежный метод снижения выбросов  $\text{NH}_3$ . Сточные желоба должны иметь отверстия для стока мочи. Такая система обеспечивает чистую поверхность пола, снижает эмиссию с его поверхности и позволяет предотвратить скольжение животных. Сокращение выбросов аммиака составляет от 25 % до 46 % по сравнению с типовой системой (Smits, 1998; Swierstra and others, 2001). В отсутствие данных фактических измерений предполагается, что использование системы полов со сточными желобами не позволяет существенно снизить другие потери  $\text{N}_r$  и  $\text{N}_2$ , поскольку она в основном предназначена для ограничения контакта экскрементов с высоким содержанием аммония с воздухом.

Таблица IV.7

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 2 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1
Степень воздействия	↓↓	— <sup>a</sup>	— <sup>a</sup>	— <sup>a</sup>	— <sup>a</sup>	↓

<sup>a</sup> Хотя эта мера не дает прямого эффекта уменьшения других потерь  $N_f$  и  $N_2$ , в той степени, в которой снижение потерь  $NH_3$  позволяет заместить неорганические удобрения образовавшимся таким образом связанным азотом, она может способствовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет уменьшения потерь  $N_f$  и  $N_2$  в более широком плане.

**Содержание животных — мера 3: Регулярная уборка полов в животноводческих помещениях**

187. Тщательная уборка зон передвижения животных в помещениях молочных ферм с помощью механических скреперов или роботизированных систем позволяет значительно сократить выбросы  $NH_3$ . Для достижения полного эффекта от данной меры автоматическую уборку следует производить через регулярные интервалы времени (например, ежечасно).

Таблица IV.8

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 3 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	3	3	3	3	1
Степень воздействия	↓	—	—	—	—	↓

**Содержание животных — мера 4: Частое удаление жидкого навоза (крупный рогатый скот)**

188. Регулярное удаление жидкого навоза из-под щелевых полов в наружное навозохранилище позволяет значительно сократить выбросы  $NH_3$  за счет уменьшения площади поверхности, с которой происходят выбросы, и снижения температуры хранения жидкого навоза. Снижение температуры хранения позволяет также сократить выбросы метана.

Таблица IV.9

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 4 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	½	3	3	3	3	½
Степень воздействия	↓	—	—	—	—	↓

**Содержание животных — мера 5: Увеличение объема подстилки (крупный рогатый скот, система с образованием твердого навоза)**

189. Материал подстилки, используемой для животных, может влиять на выбросы  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$ ). Уровень эмиссии  $\text{NH}_3$  с пола молочной фермы в большей степени зависит от физических характеристик (объем впитываемой мочи, насыпная плотность) материалов подстилки, чем от их химических свойств (рН, емкость катионного обмена, соотношение углерода и азота (Misselbrook and Powell, 2005; Powell and others, 2008; Gilhespy and others, 2009)). Вместе с тем необходимо дополнительно изучить воздействие подстилки на выбросы для конкретных систем с учетом всех этапов технологического цикла навоза. Этот подход может позитивно сочетаться с мерами по обеспечению благополучия животных.

Таблица IV.10

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 5 в отношении содержания в помещениях**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	2	3	3	3	1
Степень воздействия	~/↓	~/↓	?	?	?	~/↓

**Содержание животных — мера 6: Кондиционирование воздуха в здании для снижения температуры и воздухопотока в помещении (крупный рогатый скот)**

190. В помещениях с обычными щелевыми полами (без уклона, 1 % уклона или со сточными желобами) при оптимальном кондиционировании воздуха с термоизолированной кровлей и/или автоматически контролируемой естественной вентиляцией можно обеспечить умеренное снижение выбросов (20 %)  $\text{NH}_3$  за счет снижения температуры (особенно летом) и уменьшения скорости воздушного потока (Bram and others, 1997a, b; Smits, 1998; Monteny, 2000). Охлаждение навозохранилища в таких системах также снижает выбросы метана.

Таблица IV.11

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 6 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН <sup>a</sup>	1	⅓	⅓	⅓	⅓	1
Степень воздействия	↓↓	~—	—	—	—	↓

<sup>a</sup> Для случаев, когда в таблице приведены два значения, разделенные косой чертой, первое значение обозначает эффект от снижения температуры в помещении, а второе — эффект от снижения воздухопотока над поверхностями, покрытыми навозом.

**Содержание животных — мера 7: Использование кислотных скрубберов (крупный рогатый скот)**

191. Химические и кислотные воздушные скрубберы эффективно обеспечивают снижение выбросов  $\text{NH}_3$  в помещениях свиноводческих ферм с принудительной вентиляцией. Однако на данный момент это оборудование невозможно широко применять на животноводческих фермах, поскольку помещения для его содержания в регионе ЕЭК оборудованы в основном естественной вентиляцией. Кроме того, данных об использовании скрубберов в помещениях для крупного рогатого скота мало (Ellen and

others, 2008). Во всех тех случаях, когда крупный рогатый скот содержится в помещениях с принудительной вентиляцией, данную меру можно отнести к категории 1. В новейших разработках рассматривается возможность сочетания вентиляции животноводческих помещений с управлением по объему с естественной вентиляцией и установкой воздушных скрубберов. В этой области необходимы дальнейшие исследования и разработки.

Таблица IV.12

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 7 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1–2	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1–2
Степень воздействия	↓↓	? <sup>a</sup>	? <sup>a</sup>	? <sup>a</sup>	? <sup>a</sup>	↓ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Хотя эта мера не дает прямого эффекта уменьшения других потерь  $N_f$  и  $N_2$ , в той степени, в которой полученные  $N_f$  позволяют заместить неорганические удобрения образовавшимся таким образом связанным азотом, она может способствовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет снижения потерь  $N_f$  и  $N_2$  в более широком плане.

192. Тестируются различные модернизированные конструкции щелевых полов или сплошных полов из профилированных бетонных панелей. Полы такой конструкции позволяют добиться одновременно снижения выбросов на уровне пола (более интенсивный сток мочи) и навозохранилища (снижение воздухообмена путем установки откидных резиновых створок в щелях пола). Эффективность борьбы с выбросами зависит от конкретных технических характеристик системы.

193. Одной из эффективных мер по сокращению выбросов  $NH_3$ , которая рассматривается ниже в главе IV, является уменьшение количества экскрементов животных в системах стойлового содержания за счет увеличения длительности выпасного периода. Сокращение общих годовых выбросов (включая выбросы в процессе стойлового содержания, хранения навоза и внесения его в почву) при почти круглосуточном выпасе скота в молочных животноводческих хозяйствах может достигать 50 % по сравнению с полностью стойловым содержанием. Хотя увеличение длительности выпаса является одной из надежных мер по сокращению выбросов  $NH_3$  для молочного скота, объем сокращения выбросов зависит от количества часов выпаса в сутки, а также от чистоты помещения, в котором содержатся животные, и преддоильной площадки. В некоторых случаях выпас скота может также приводить к увеличению стока и выщелачиванию  $NO_3^-$  и других соединений  $N_f$ , а также выбросов  $N_2O$  и  $NO_x$ . Выпас скота также может быть связан с повышенной мобилизацией патогенных микроорганизмов.

## 2. Стойловое содержание свиней

194. Существующие разработки по сокращению выбросов  $NH_3$  в системах содержания свиней подробно описаны в документе Европейского бюро по комплексному предотвращению и контролю загрязнений (МГЭИК) по наилучшим имеющимся технологиям (НИМ) (Santonja and others 2017). В них предусматриваются следующие основные элементы:

а) сокращение площади покрытых навозом поверхностей, например загрязненных полов, путем устройства в полах каналов для стока жидкого навоза и наклонных стенок. При частично щелевых полах (~50 % площади) выделения  $NH_3$  обычно меньше, особенно если покрытие изготовлено не из бетона, а из металла или пластика, по которым весь навоз быстро соскальзывает в расположенные под полом накопители. Выбросы из зон со сплошными полами сокращаются за счет устройства гладких поверхностей с уклоном, размещения кормушек и поилок таким образом,

чтобы свести к минимуму загрязнение этих зон, а также надлежащее поддержание заданных параметров микроклимата свинарника;

b) частое удаление жидкого навоза из накопителей во внешнее навозохранилище за счет устройства вакуумной или самотечной системы удаления жидкого навоза или системы смыва не реже двух раз в неделю;

c) дополнительная обработка, например разделение на жидкую/твердую фракции, при том условии, что при хранении разных фракций будет сохранен низкий уровень выбросов;

d) циркуляция грунтовой воды или других охлаждающих агентов в теплообменниках с плавающей головкой или в стенках накопительных резервуаров для охлаждения поверхности навоза в расположенных под полом накопителях до температуры не выше 12 °С. Здесь имеются ограничения, а именно необходимость дополнительных затрат и наличие источника грунтовых вод на определенном расстоянии от источника питьевой воды;

e) изменение химических/физических свойств навоза, например снижение pH;

f) использование гладких и легко очищаемых поверхностей (см. выше);

g) очистка отходящего воздуха с помощью кислотных скрубберов или капельных биологических фильтров;

h) снижение температуры и интенсивности вентиляции в помещении с учетом естественных потребностей животных и соображений, связанных с производственным процессом;

i) уменьшение воздухопотока над поверхностью навоза.

195. Для заданной ширины пластины панели щелевого пола сток навоза с бетонных панелей хуже, чем со щелевых панелей с металло- или пластиковым покрытием, что приводит к большим выбросам NH<sub>3</sub>. Следует отметить, что в некоторых странах использование металлических щелевых полов запрещено по причинам, связанным с обеспечением благополучия животных. При выборе НИМ для различных конструкций животноводческих помещений следует учитывать эффект взаимодействия различных сред. Например, частый смыв навоза (как правило, один раз утром и один раз вечером) вызывает появление неприятного запаха. Кроме того, при смыве навоза потребляется энергия, если только не используются немеханизированные пассивные системы.

196. Предполагается, что в связи с заботой о благополучии животных соломенная подстилка в свинарниках будет использоваться все более активно. В свинарниках, оборудованных системой естественной вентиляции (автоматизированной) и соломенной подстилкой, животные могут самостоятельно регулировать температуру тела при меньшем объеме вентиляции и обогрева, что позволяет снизить потребление энергии. В системах с использованием подстилки станки иногда разделяются на участки со сплошным полом, где находится подстилка, и участки со щелевыми полами для экскреции. Однако животные не всегда используют эти зоны по назначению: они могут справлять нужду в зонах с подстилкой и лежать на щелевых полах, стремясь найти прохладное место в жаркую погоду. В целом конструкция станков должна быть таковой, чтобы животные справляли нужду в определенном месте, что позволяет свести к минимуму загрязнение сплошных полов. В регионах с жарким климатом добиться этого сложнее. Отметим, что при комплексной оценке использования соломы следует учитывать:

a) дополнительные затраты на солому и чистку станков;

b) возможное увеличение выбросов в результате хранения и внесения навоза с соломой;

c) положительные факторы, связанные с внесением в почву органических веществ, содержащихся в соломе.

197. В Европе широко используется типовая система со сплошным щелевым полом с глубокими навозосборниками под ним и механической вентиляцией; выбросы составляют от 2,4 до 3,2 кг NH<sub>3</sub> на животное на финишном этапе откорма в год. Поскольку содержание свиноголовья на откорме всегда групповое, большинство систем, используемых для группового содержания свиноматок, применимы к свиньям на откорме. Именно по отношению к этой типовой системе оценивается сокращение выбросов в результате применения различных подходов по борьбе с загрязнением/смягчению его последствий (Bittman and others, 2014). Большая часть имеющихся данных касается NH<sub>3</sub>, а данных о воздействии на выбросы N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub> и нитратное выщелачивание мало. Принципы, положенные в основу для анализа этих потерь, во многом схожи с принципами, применяемыми к системам содержания крупного рогатого скота, с учетом иных потребностей свиноголовья в части содержания и особых свойств экскрементов свиней.

#### Содержание животных — мера 8: Подкисление жидкого навоза (содержание в помещениях свиней и крупного рогатого скота)

198. Снижение выбросов NH<sub>3</sub> может быть достигнуто путем подкисления жидкого навоза, чтобы сместить химическое равновесие от молекулярного NH<sub>3</sub> к ионному NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Навоз (особенно жидкая фракция) аккумулируется в резервуаре с подкисленной жидкостью (обычно используется серная кислота; можно использовать и органические кислоты, однако затраты в этом случае будут выше), и показатель pH в нем поддерживается на уровне не менее 6 (Bittman and others, 2014; Fanguiero and others, 2015). В системах стойлового содержания свиней наблюдалось сокращение выбросов на 60 % и выше (Kai and others, 2008). Предполагается, что эта мера не влияет на другие потери N<sub>r</sub> или N<sub>2</sub>. Предполагается также, что подкисление эффективно как для жидкого навоза крупного рогатого скота, так и свиней, хотя измерения пока в основном проводились в рамках исследований жидкого навоза свиней. Одно из исследований (Petersen and others, 2012) показало, что подкисление жидкого навоза крупного рогатого скота до уровня pH 5,5 приводит к сокращению выбросов NH<sub>3</sub> более чем на 90 % и к одновременному сокращению выбросов парникового газа (ПГ) CH<sub>4</sub> на 67–87 %. Поскольку нитрификация и денитрификация уменьшаются, можно ожидать, что этот метод позволит также снизить выбросы NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O и N<sub>2</sub>. Если подкисленный жидкий навоз будет далее использоваться в сельском хозяйстве, то следует вести мониторинг pH и содержания металлов в почве. Подкисление на месте (животноводческом предприятии) позволит сократить выбросы NH<sub>3</sub> по всей цепочке управления навозом. Вместе с тем подкисленный серной кислотой жидкий навоз не может использоваться в качестве единственного сырья для производства биогаза (но может быть использован как одна из составляющих сырья).

Таблица IV.13

#### Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 8 в отношении содержания животных в помещениях

Форма азота	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub>	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	2	2	3 <sup>a</sup>	2	1 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓↓	↓	~/↓?	~ <sup>a</sup>	↓	↓↓ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Хотя данных о том, что эта мера позволяет напрямую снизить NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, не имеется, в той степени, в которой снижение потерь NH<sub>3</sub> позволяет заместить неорганические удобрения образовавшимся таким образом связанным азотом (например, когда регулирующие удобрения нормы требуют учитывать улучшенные удобрительные свойства), она может способствовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет снижения потерь N<sub>r</sub> и N<sub>2</sub> в более широком плане.

**Содержание животных — мера 9: Уменьшение площади поверхности, с которой происходят выбросы (свиньи)**

199. Выбросы аммиака могут быть снижены на 25 % за счет уменьшения площади поверхности, с которой происходят выбросы, и путем частого и полного вакуумного дренажа жидкого навоза со дна навозосборника. В случае возможности применения данного метода дополнительных затрат не потребуется. Выбросы  $\text{NH}_3$  с частично щелевых полов, покрывающих 50 % площади, как правило, на 15–20 % меньше, особенно если панели щелевого пола изготовлены из металла или пластика, на которые навоз налипают меньше, чем на бетон. Снижение риска выбросов со сплошной части пола может быть достигнуто посредством:

- a) использование полов с гладкой наклонной (или выпуклой) поверхностью;
- b) размещение кормушек и поилок таким образом, чтобы минимизировать загрязнение сплошных участков;
- c) поддержание надлежащего микроклимата (Aarnink and others, 1996; Guigand and Courboulay, 2007; Ye and others, 2008a, 2008b).

200. Дальнейшее сокращение площади выбросов может быть достигнуто за счет уменьшения щелевой части полов и расположенных под полами навозосборников. При уменьшении щелевой зоны полов появляется риск большего загрязнения поверхности со сплошным полом, который может быть снижен за счет обустройства еще одной небольшой зоны щелевых полов с заполняемым водой каналом с другой стороны станка, где животные подходят к кормушке и поилке. Канал заполняется водой примерно на 2 см, и это позволяет разбавить попадающий в него навоз. Поскольку в данной зоне щелевых полов попавший в навозный канал навоз будет разбавлен, выбросы в ней будут ниже. Такая система, сочетающая навозный и водный каналы, позволяет снизить выбросы  $\text{NH}_3$  на 40–50 % в зависимости от размеров водного канала. Предполагается, что этот подход не оказывает значительного влияния на выбросы  $\text{N}_2$  или других соединений  $\text{N}_r$ .

201. Сокращение площади поверхности выбросов путем устройства в навозном канале одной или двух стенок с уклоном в сочетании с частично щелевым полом и частое удаление навоза могут дать сокращение объема выбросов до 65 %. Уменьшение площади поверхности выбросов посредством устройства неглубоких V-образных каналов (максимум 60 см в ширину, 20 см в глубину) может сократить выбросы в свинарниках на 40–65 %, в зависимости от категории свиней и наличия в них зон со щелевыми полами. Два раза в день в каналах следует производить смыв, используя для этого жидкую (тонкую) фракцию навоза, а не воду; промывка водой приводит к разбавлению навоза и увеличивает затраты на его транспортировку и внесение в почву.

Таблица IV.14

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 9 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1
Степень воздействия	↓↓	— <sup>a</sup>	? <sup>a</sup>	? <sup>a</sup>	? <sup>a</sup>	↓↓ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Хотя эта мера не дает прямого эффекта уменьшения других потерь  $\text{N}_r$  и  $\text{N}_2$ , в той степени, в которой снижение потерь  $\text{NH}_3$  позволяет заместить неорганические удобрения образовавшимся таким образом связанным азотом, она может способствовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет снижения потерь  $\text{N}_r$  и  $\text{N}_2$  в более широком плане.

**Содержание животных — мера 10: Регулярная уборка полов (свиньи)**

202. Уборка полов в свинарниках механическими скреперами или роботами позволяет значительно сократить выбросы  $\text{NH}_3$ . Для достижения полного эффекта от данной меры автоматическую уборку следует производить через регулярные интервалы времени (Amon and others, 2007). Следует отметить, что в странах с жарким климатом (например, в Средиземноморском регионе) в соответствии с санитарно-гигиеническими нормами уборка пола проводится чаще, вследствие чего содержание воды в навозной жиже может достигать 98 %.

Таблица IV.15

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 10 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	3	3	3	3	1
Степень воздействия	↓	–	–	–	–	↓

**Содержание животных — мера 11: Частое удаление жидкого навоза (свиньи)**

203. Регулярное удаление жидкого навоза из-под щелевых полов в наружное навозохранилище может позволить значительно сократить выбросы  $\text{NH}_3$  за счет уменьшения площади поверхности, с которой происходят выбросы, и температуры хранения жидкого навоза. Снижение температуры хранения позволит также сократить объемы выбросов метана (Amon and others, 2007).

Таблица IV.16

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 11 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	3	3	3	3	½
Степень воздействия	↓	–	–	–	–	↓

**Содержание животных — мера 12: Увеличение объема подстилки (свиньи, системы с образованием твердого навоза)**

204. Материал, используемый для подстилки животным, может влиять на выбросы  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$ . Для определения выбросов  $\text{NH}_3$  от полов молочных коровников физические характеристики (объем впитываемой мочи, насыпная плотность) материалов подстилки важнее их химических свойств (рН, емкость катионного обмена, соотношение углерода и азота) (Misselbrook and Powell, 2005; Powell and others, 2008; Gilhespy and others, 2009). Вместе с тем требуется дополнительная оценка воздействия подстилки на выбросы для конкретных систем с учетом всего процесса уборки, хранения и использования навоза. Этот подход может положительно рассматриваться в аспекте обеспечения благополучия животных. Вместе с тем подходы, направленные на улучшение благополучия животных, могут также применяться как системы с образованием жидкого навоза при введении небольшого количества соломы.

Таблица IV.17

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 12 в отношении содержания для подстилки животных в помещениях**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	2	3	3	3	1
Степень воздействия	~/↓	~/↓	–	–	–	~/↓

**Содержание животных — мера 13: Кондиционирование воздуха в помещениях для снижения температуры и воздухопотока в помещении (свиньи)**

205. Охлаждение поверхности навоза вентиляторами в закрытой системе теплообмена позволяет сократить выбросы 45–75 % в зависимости от категории животных и площади охлаждающих пластин радиаторов. Эта технология наиболее экономична, если собранное тепло направляется через обменник на обогрев других объектов, например помещений для поросят-отъемышей (Huynh and others, 2004). В системах с образованием жидкого навоза данный метод во многих случаях может использоваться в уже существующих зданиях путем установки соответствующего оборудования. Однако в системах с использованием соломенной подстилки или при рационе питания с большим объемом грубого корма данный метод неприменим. Это связано с тем, что на поверхности жижи может образовываться налет.

Таблица IV.18

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 13 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН <sup>a</sup>	1	2/3	2/3	2/3	2/3	1
Степень воздействия	↓	–	–	–	–	↓

<sup>a</sup> Для случаев, когда в таблице приведены два числа, разделенные косой чертой, первое число обозначает эффект от снижения температуры в помещении, а второе — эффект от снижения воздухопотока над поверхностями, покрытыми навозом.

**Содержание животных — мера 14: Использование кислотных скрубберов (свиньи)**

206. Очистка отходящего воздуха кислотными скрубберами (в основном с использованием серной кислоты) или капельными биологическими фильтрами хорошо зарекомендовала себя как практически удобный и эффективный метод в крупных животноводческих хозяйствах Дании, Франции, Германии и Нидерландов (например, см. Melse and Ogink, 2005; Guingand, 2009). Он наиболее экономичен в случае оснащения соответствующим оборудованием новых зданий, поскольку для его установки в уже существующих помещениях необходимо проведение высокочрезвычайно работ по модификации систем вентиляции. Эффективность удаления  $NH_3$  кислотными скрубберами составляет более 90 %, в зависимости от установленных значений pH. Скрубберы и капельные биологические фильтры снижают также запах и содержание PM на 75 % и 70 % соответственно (Guingand, 2009). Необходима дополнительная информация о пригодности этих систем для использования в Южной и Центральной Европе. Эксплуатационные расходы как кислотных скрубберов, так и капельных биологических фильтров в основном зависят от дополнительного расхода энергии на рециркуляцию воды и на преодоление

возрастающего обратного давления на вентиляторы. Затраты могут быть уменьшены благодаря существующим методам оптимизации (Melse and others, 2012), а кроме того, они будут ниже для крупных хозяйств. Такой подход может также способствовать сокращению выбросов  $N_2O$  и  $NO_x$ , однако в этой области необходимы дополнительные исследования.

Таблица IV.19

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 14 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	2	2	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1
Степень воздействия	↓↓	↓	↓	— <sup>a</sup>	— <sup>a</sup>	↓↓ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Хотя эта мера не дает прямого эффекта уменьшения других потерь  $NO_3^-$  и  $N_2$ , в той степени, в которой полученные  $N_f$  позволяют заместить неорганические удобрения образовавшимся таким образом связанным азотом, она может способствовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет снижения потерь  $N_f$  и  $N_2$  в более широком плане.

#### Содержание животных — мера 15: Использование биологических скрубберов (свиньи)

207. В биологических скрубберах очистка происходит с помощью бактерий, удаляющих из отходящего воздуха аммиак и неприятный запах. Аммиак, уловленный в биологических скрубберах, как правило, подвергается нитрификации и денитрификации, что приводит к увеличению выбросов  $N_2O$ ,  $NO_x$  и  $N_2$ . Рекуперация уловленного в биоскрубберах  $N_f$  может частично компенсировать это увеличение за счет снижения потребности в новом связывании азота и производстве химических удобрений.

Таблица IV.20

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 15 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	2	2	3	3	1
Степень воздействия	↓↓	3 <sup>a</sup>	↑ <sup>a</sup>	—	↑ <sup>a</sup>	↓

<sup>a</sup> Аммиак, уловленный в биологических скрубберах, как правило, подвергается нитрификации и денитрификации, что приводит к увеличению выбросов  $N_2O$ ,  $NO_x$  и  $N_2$ . Рекуперация уловленного в биоскрубберах  $N_f$  может частично компенсировать это увеличение за счет снижения потребности в новом связывании азота и производстве химических удобрений.

### 3. Содержание птицы в помещениях

208. Существующие системы для сокращения выбросов  $\text{NH}_3$  в системах содержания птицы подробно описаны в документе по НИМ, разработанном в соответствии с директивой Европейского союза по промышленным выбросам<sup>18</sup> (Santonja and others, 2017), и в них применены следующие принципы:

- a) уменьшение площади открытой поверхности помета, с которой происходят выбросы;
- b) частое удаление помета из птичника во внешнее навозохранилище (например, с помощью ленточных систем пометоудаления);
- c) быстрое высушивание помета с целью уменьшения интенсивности гидролиза мочевой кислоты до аммиака;
- d) использование гладких, легко очищаемых поверхностей;
- e) обработка отходящего воздуха кислотными скрубберами или капельными биологическими фильтрами (например, биологическими скрубберами);
- f) понижение температуры и уменьшение вентилирования помещения до минимальных значений, не несущих в себе риска для благополучия животных и/или не препятствующих производственному процессу, что снижает активность микробных процессов, при которых используются потери  $\text{N}_r$ .

209. Многие из мер, перечисленных для крупного рогатого скота и свиней, применимы также к системам птицеводства, особенно меры по содержанию 2 и 9 (Уменьшение площади поверхности, с которой происходят выбросы), 6 и 13 (Кондиционирование воздуха в здании для снижения температуры и воздухопотока в помещении) и 7 и 14 (Кислотные скрубберы). Поэтому в данном разделе рассматриваются дополнительные вопросы, касающиеся только содержания птицы. С дальнейшей информацией можно ознакомиться в справочном документе МГЭИК «Наилучшие имеющиеся технологии» (Santonja and others, 2017) и в руководящем документе ЕЭК ООН по аммиаку (Bittman and others, 2014).

210. В случае устройства птичников не на грунте, а на основании (например, бетонном полу) меры по сокращению выбросов  $\text{NH}_3$  прямо не влияют на выщелачивание и стоки в виде нитратов и других  $\text{N}_r$ . В случае небольших хозяйств, не обязанных соблюдать национальное законодательство (например, следовать НИМ) в отношении разведения несушек, и при выгульном содержании птицы появляются возможности для попадания этих соединений в почву. В таких случаях сокращение выбросов  $\text{NH}_3$ , включая быстрое высушивание и сухое хранение птичьей подстилки, может также давать положительные результаты для уменьшения выщелачивания  $\text{N}_r$ . Кроме того, наблюдения экспертов показали, что при направлении воздухопроводов вниз на пористую грунтовую поверхность вокруг птичника могут появляться локализованные зоны повышенных выщелачивания и стоков  $\text{N}_r$  в грунтовые воды. Таким образом, снижение выбросов  $\text{NH}_3$  (и  $\text{N}_r$ -содержащей пыли) может также способствовать уменьшению таких зон повышенного выщелачивания и стоков  $\text{N}_r$ .

### 4. Куры-несушки

211. В регионе ЕЭК ООН принят широкий комплекс норм и минимальных стандартов по защите кур-несушек. Например, в Европейском союзе действуют нормы, установленные директивой Европейского совета 1999/74/ЕС<sup>19</sup>. В силу этой директивы с 2012 года обычные системы клеточного содержания запрещены. Разрешены только улучшенные клетки (также называемые клетками улучшенной

---

<sup>18</sup> Директива 2010/75/ЕС Европейского парламента и Совета Европейского союза от 24 ноября 2010 года о промышленных выбросах (о комплексном предотвращении загрязнения и контроле над ним), *Official Journal of the European Union*, L 334 (2010), pp. 17–119.

<sup>19</sup> Директива Совета 1999/74/ЕС от 19 июля 1999 года, устанавливающая минимальные стандарты для защиты кур-несушек, *Official Journal of the European Communities*, L 203 (1999), pp. 53–57.

конструкции) или системы не клеточного содержания, например на подстилке (или глубокой подстилке) или содержание на многоуровневых сетчатых полах.

#### Содержание животных — мера 16: Быстрое высушивание подстилки

212. Выбросы аммиака из пометных ям или каналов при содержании в клеточной батарее могут быть снижены за счет уменьшения влажности помета путем вентилирования пометной ямы. Сбор помета транспортерами и его последующее удаление для крытого хранения за пределами здания также могут сократить выбросы  $\text{NH}_3$ , особенно если помет высушивается на транспортерах с принудительной вентиляцией. Для минимизации последующего образования  $\text{NH}_3$  помет должен быть высушен до фракции 60–70 % СВ. Помет, перемещенный с транспортеров в интенсивно вентилируемые сушильные туннели, расположенные внутри здания или за его пределами, может высушиваться до состояния 60–80 % СВ менее чем за 48 часов, однако в этом случае увеличивается контакт с воздухом, что может приводить к увеличению выбросов  $\text{NH}_3$ . Еженедельное удаление помета с транспортеров и перемещение его в крытые помехохранилища сокращают выбросы на 50 % по сравнению с удалением раз в две недели. Как правило, выбросы из курятников для кур-несушек, оборудованные транспортерами для удаления помета, будут зависеть от:

- длительности нахождения помета на транспортере;
- сушильных систем;
- пород птицы;
- интенсивности вентилирования на транспортере (низкая интенсивность = высокие выбросы);
- состава корма.

213. В системах с многоуровневыми сетчатыми полами, оборудованными пометными транспортерами для частого сбора и удаления помета в закрытые помехохранилища, выбросы сокращаются более чем на 70 % по сравнению с системами содержания на глубокой подстилке. Если первичное просушивание подстилки для птицы позволяет сократить выбросы  $\text{NH}_3$ , то поддержание выделенного азота в форме мочевой кислоты также позволяет сократить выбросы  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$ , поскольку при этом также замедляются процессы нитрификации и денитрификации. Таким образом, сельхозпроизводители получают навоз с улучшенными удобрительными свойствами, что позволит уменьшить количества вносимых в почву удобрений (см. главу V), по сравнению с перепревшей птичьей подстилкой.

Таблица IV.21

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 16 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1
Степень воздействия	↓↓	~/↓ <sup>a</sup>	~/↓ <sup>a</sup>	~/↓ <sup>a</sup>	~/↓ <sup>a</sup>	↓↓

<sup>a</sup> Хотя эта мера в первую очередь направлена на борьбу с загрязнением  $\text{NH}_3$ , стабильность мочевой кислоты в высушенной птичьей подстилке может содействовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет уменьшения потерь  $\text{N}_r$  и  $\text{N}_2$  в более широком плане и снижения потребности в специальном производстве  $\text{N}_r$ .

**Содержание животных — мера 17: Использование кислотных скрубберов (птица)**

214. Очистка отходящего воздуха в кислотных скрубберах успешно применяется в ряде стран (Melse and Ogink, 2005; Ritz and others, 2006; Patterson and Adrizal, 2005; Melse and others, 2012). Согласно Hahne and others (2016), в Германии насчитывается 179 скрубберов, установленных в птичниках, и 1012 скрубберов, установленных в свинарниках. Основное различие между системами содержания свиней и птичьими заключается в том, что в птичниках (особенно в случае высушивания подстилки), как правило, образуется гораздо больше пыли. Кислотные скрубберы удаляют 70–90 %  $\text{NH}_3$ , а также мелкую пыль и запах. Для высоких пылевых нагрузок разработаны многоступенчатые скрубберы с предварительной фильтрацией крупных частиц (Ogink and others, 2007; Melse and others, 2008). Однако из-за проблемы пылевой нагрузки некоторые эксперты относят этот метод только к категории 2.

Таблица IV.22

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 17 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	2	2	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1
Степень воздействия	↓↓	↓	↓	– <sup>a</sup>	– <sup>a</sup>	↓↓ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Хотя эта мера не дает прямого эффекта уменьшения других потерь  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{N}_2$ , в той степени, в которой полученные  $\text{N}_r$  позволяют заместить неорганические удобрения образовавшимся таким образом связанным азотом, она может способствовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет снижения потерь  $\text{N}_r$  и  $\text{N}_2$  в более широком плане.

**Содержание животных — мера 18: Использование биологических скрубберов (птица)**

215. Очистка отходящего воздуха при помощи капельных биологических фильтров (биологических скрубберов) успешно применяется в ряде стран (Melse and Ogink, 2005; Ritz and others, 2006; Patterson and Adrizal, 2005; Melse, Hofschreuder and Ogink, 2012). Установлено, что биологические скрубберы позволяют сократить выбросы  $\text{NH}_3$  на 70 %, а также удаляют мелкую пыль и запахи. Для высоких пылевых нагрузок разработаны многоступенчатые скрубберы с предварительной фильтрацией крупных частиц (Ogink and Bosma, 2007; Melse, Ogink and Bosma, 2008). Однако из-за проблемы пылевой нагрузки и возможной отрицательной корреляции с другими потерями  $\text{N}_r$  некоторые эксперты относят этот метод только к категории 2.

Таблица IV.23

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 18 в отношении содержания животных в помещениях**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3	3 <sup>a</sup>	1
Степень воздействия	↓↓	↑ <sup>a</sup>	↑ <sup>a</sup>	–	↑ <sup>a</sup>	↓ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Аммиак, уловленный в биологических скрубберах, как правило подвергается нитрификации и денитрификации, что может приводить к увеличению выбросов  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$ . Рекуперация уловленного в биоскрубберах  $\text{N}_r$  может частично компенсировать это увеличение за счет снижения потребности в новом связывании азота и производстве химических удобрений.

## 5. Бройлеры

216. Чтобы свести к минимуму выбросы  $\text{NH}_3$  в птичниках для бройлеров важно держать подстилку сухой. На влажность подстилки и выбросы оказывают влияние:

- a) конструкция и использование поилок (подтекание и разлив);
- b) масса и плотность посадки птиц, а также продолжительность периода роста;
- c) интенсивность вентиляции, очистка воздуха внутри помещения и погодные условия окружающей среды;
- d) использование изоляции в полах;
- e) тип и объем подстилки;
- f) корм.

217. Уменьшение подтекания воды из поилок. Простым способом уменьшения подтекания воды из поилок является замена колокольных поилок на ниппельные. Этот подход следует интегрировать в комплекс мер, направленных на поддержание птичьей подстилки в сухом состоянии, описанных в составе меры 16 (Быстрое высушивание птичьей подстилки).

218. Хорошие результаты дает использование скрубберов для удаления  $\text{NH}_3$  из вентилируемого воздуха, однако в настоящее время этот метод не получил широкого распространения из-за высоких затрат на установку и эксплуатацию. Современные насадочные фильтры и кислотные скрубберы, применяемые в Нидерландах и Германии, удаляют из отходящего воздуха 70–90 %  $\text{NH}_3$ . Немецкая сельскохозяйственная ассоциация (DLG, 2020) проводит комплексные замеры работы скрубберов по системе испытаний, разработанной на основе научных стандартов. Как и в случае подобных систем для несушек, необходимо уточнить вопросы долгосрочной надежности этого метода в условиях высокой пылевой нагрузки. Для удаления из отходящего воздуха неприятных запахов и РМ ( $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2,5}$ ) разработаны различные многофункциональные скрубберы (Zhao and others, 2011; Ritz and others, 2006; Patterson and Adrizal, 2005). Применение как кислотных (Содержание животных в помещениях — мера 17), так и биологических скрубберов (Содержание животных в помещениях — мера 18) к птичникам для бройлеров во многом схоже с применением данных агрегатов в помещениях для содержания кур-несушек.

## Е. Хранение, обработка и переработка навоза

### 1. Принципы хранения, обработки и переработки навоза

219. Для обеспечения устойчивости в животноводстве необходимо оптимально и эффективно использовать питательные и органические вещества, содержащиеся в навозе. Однако содержащийся в навозе азот может легко теряться в результате газообразных выбросов ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2$ ) и выщелачивания нитратов ( $\text{NO}_3^-$ ) и других соединений  $\text{N}_r$ . Помимо потерь азота, необходимо максимально снизить выбросы в атмосферу метана ( $\text{CH}_4$ ) от животных и навоза, чтобы ограничить климатическое воздействие. Если при хранении навоза не обеспечивается его изоляция с помощью водонепроницаемых барьеров для предотвращения утечек жидкого навоза или выщелачивания из твердого навоза, то могут иметь место выщелачивание нитратов и загрязнение водотоков азотом, фосфором и органическими соединениями.

220. Значительные потери азота могут происходить во время хранения мочи и фекалий, либо смесей (жидкий навоз и навоз/глубокая подстилка), в то же время простая обработка (например, сепарирование твердой и жидкой фракции) или более сложная переработка (например, анаэробное сбраживание, ультрафильтрация) позволяют усовершенствовать уборку, хранение и использование навоза, снизив потери азота.

221. Обработка навоза, как правило, предусматривает одноэтапную операцию по улучшению его свойств. Ожидаемые результаты: улучшение текучести (путем

добавления воды или отделением твердой фракции); стабилизация летучих питательных веществ (путем подкисления); уменьшение неприятного запаха (например, аэрация). Одноступенчатая обработка навоза обычно проводится в животноводческом хозяйстве, вблизи от зданий, в которых содержатся животные. В результате такой обработки масса и состав навоза не меняются или меняются незначительно.

222. Под переработкой навоза, как правило, понимаются более сложные и многоступенчатые процессы, имеющие целью производство нового продукта, например с более высоким содержанием питательных веществ, сниженным влагосодержанием, без неприятного запаха и безопасного в санитарном отношении. В большинстве случаев навоз перерабатывается в товарную продукцию, которая может быть использована в качестве удобрений и структурообразователей почвы, а также вторичного сырья (например, волокна). Переработка навоза может осуществляться как в самих животноводческих хозяйствах, так и на централизованных/децентрализованных производственных объектах.

223. Обработка и переработка навоза во всех случаях имеют определенную стоимость как с экономической, так и энергетической и экологической точек зрения, поэтому в качестве приоритетного всегда должен выбираться наиболее простой способ достижения поставленной цели (целей):

- a) прямое внесение в почву;
- b) простая обработка;
- c) многоэтапная переработка (с использованием прежде всего меры a), в соответствии с местными ограничениями, в том числе, касающимися загрязнения).

224. Простая обработка и многоэтапная переработка наиболее актуальны, когда условия (например, высокая плотность поголовья скота в регионе, большой избыток азота навоза в сравнении с потребностями местных культур) благоприятны для обработки или переработки в более общем экологическом контексте. Такие системы следует разрабатывать с учетом необходимости не допускать замены одного вида загрязнения другим (например, потери аммиака уменьшаются, но при этом растет выщелачивание нитратов на каком-либо ином этапе, и наоборот).

225. Как правило, состав жидкого навоза животных не идеален с точки зрения низкого уровня выбросов и удобряющих свойств для использования в растениеводстве. В частности, высокое содержание сухого вещества и углерода создает ряд проблем при хранении и внесении жидкого навоза и его утилизации в процессе выращивания сельскохозяйственных растений (см. таблицу IV.24 ниже). Это указывает на возможность более интенсивного развития систем раздельного сбора и хранения мочи и навоза (мера 1 в отношении содержания в помещениях) или обработки навоза методом разделения твердой и жидкой фракций.

226. В случае высокого содержания сухого вещества в навозе на его поверхности часто образуется корка и/или формируются отложения на дне навозоаккумулятора. Для равномерного распределения питательных веществ в навозной жиже перед внесением в почву ее необходимо перемешивать/гомогенизировать. Гомогенизация навозной жижи с высоким содержанием сухого вещества — процесс энергоемкий и приводит к увеличению выбросов  $\text{NH}_3$ , поскольку при этом в тесный контакт с воздухом вступает больший объем навозной жижи.

227. В жидком навозе содержится много легко разлагающегося углерода, служащего субстратом для микроорганизмов. При хранении жидкого навоза происходит процесс постоянного разложения органического вещества. Интенсивность разложения в значительной степени зависит от содержания в навозе сухого вещества. В Amon and others (1995) исследуются изменения в составе навозной жижи за 200-дневный период хранения навоза крупного рогатого скота и свиней. В результате установлено, что при более высоком содержании сухого вещества в жидком навозе органическое вещество разлагается гораздо более активно. При этом процессе происходит также минерализация из органического вещества до формы аммония ( $\text{NH}_4^+$ ). Это указывает на возможность улучшения удобрительных свойств навоза при закрытом хранении, что

дает выигрыш с точки зрения предотвращения выбросов  $\text{NH}_3$  и повышенного содержания  $\text{NH}_4^+$  в навозе.

228. Поскольку в жидком навозе создается анаэробная среда, в нем всегда преобладает анаэробное разложение органического вещества. Его конечными продуктами являются как  $\text{CH}_4$ , так и  $\text{CO}_2$ . Из этого следует, что высокое содержание сухого вещества в навозной жиже влечет за собой больший риск выбросов  $\text{CH}_4$ , существенно влияющего на изменение климата. Это также указывает на возможность восстановления  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , например, в процессе анаэробного сбраживания для производства биогаза (см. Навоз — мера 8).

229. Экологически чистый подход к внесению навозной жижи на поля предусматривает ее более равномерное распределение на уровне поверхности почвы или ниже него. Выполнить это требование при высоком содержании сухого вещества сложнее, поскольку такой навоз более вязок и хуже проходит через шланги при внесении способом ленточного разбрасывания. После внесения навозной жижи выбросы  $\text{NH}_3$  могут быть значительными и еще более возрасть с учетом замедления инфильтрации навоза в почву в случае высокого содержания сухого вещества (Sommer and others, 2013; Bitmann and others 2014). Это указывает на важность поддержания низкого содержания сухого вещества в жидком навозе. Благодаря снижению потерь  $\text{NH}_3$  и других форм азота увеличиваются ресурсы азота, имеющиеся в хозяйствах, и снижается потребность в закупке дополнительного азота в виде синтетических неорганических удобрений.

Таблица IV.24

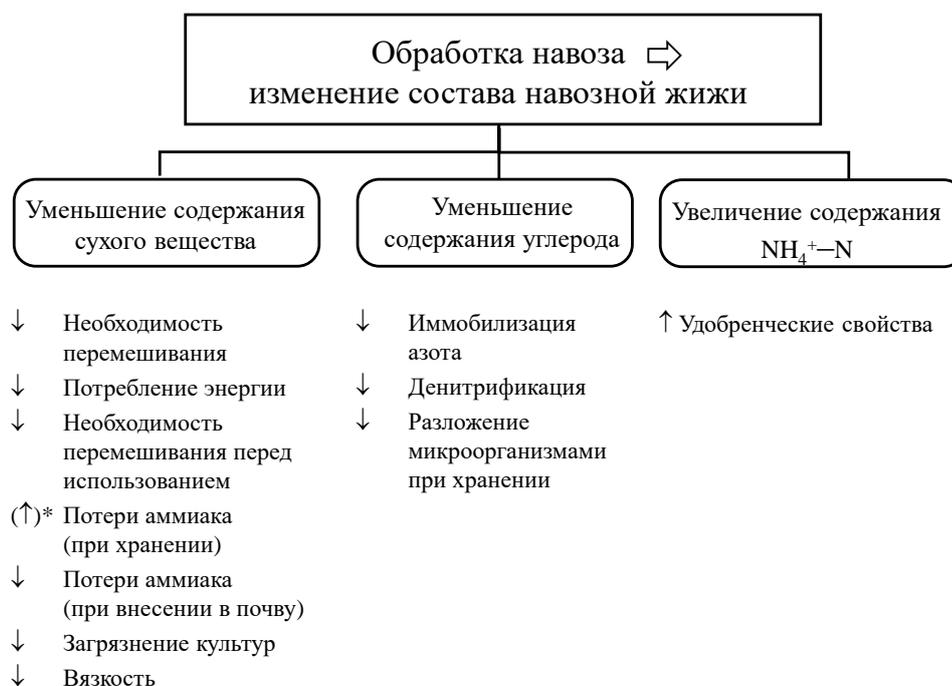
**Отрицательные и положительные последствия высокого содержания сухого вещества и углерода и низкого содержания питательных веществ в жидком навозе**

<i>Отрицательные последствия</i>	
Хранение	Естественное образование корки и осаждение твердых частиц, приводящие к неоднородной концентрации питательных веществ Высокое энергопотребление для перекачки и смешивания на единицу питательного вещества Более высокие выбросы $\text{NH}_3$ , $\text{N}_2\text{O}$ , $\text{N}_2$ , $\text{CH}_4$ и неприятный запах
Внесение в почву	Высокий потенциальный риск потерь $\text{NH}_3$ из-за медленной инфильтрации Для обеспечения равномерного внесения с низким уровнем выбросов необходимо применение сложных технологий (с высокими затратами) Ущерб возделываемым растениям от ожогов навозной жижей при ее внесении разбрызгиванием
Использование растениями	Поглощение растениями азота из навозной жижи менее эффективно, чем при внесении минеральных удобрений Повышенная временная иммобилизация азота в почве, что увеличивает риск снижения воздействия азота на растения Повышенный риск денитрификации и последующих выбросов $\text{N}_2\text{O}$ и $\text{N}_2$ Воздействие азота на растения менее предсказуемо/более нестабильно, чем при внесении минеральных удобрений
<i>Положительные последствия</i>	
Хранение	Естественное образование корки может служить естественным барьером, препятствующим переносу $\text{NH}_3$ в атмосферу; кроме того, корка может обладать значительной способностью к окислению $\text{CH}_4$ в связи с частично аэробными условиями и высокой активностью микроорганизмов
Поле/почва	Высокое содержание сухого вещества и углерода способствует поддержанию содержания органического вещества и биологической активности в почве

230. Доступность азота для растений в случае использования навозной жижи с высоким содержанием сухого вещества трудно оценить количественно, так как высокое содержание сухого вещества приводит к усилению иммобилизации микроорганизмов сразу после внесения навоза. Чем меньше соотношение C:N и чем выше содержание  $\text{NH}_4\text{-N}$ , тем больше содержащегося в навозе азота потенциально доступно растениям, в то время как при увеличении соотношения C:N часть азота навозной жижи иммобилизуется в виде азота почвы и становится доступной только на более позднем этапе; точный момент иммобилизации зачастую предсказать невозможно, или же она наступает слишком поздно, что увеличивает риск выщелачивания нитратов. Кроме того, увеличение содержания сухого вещества в навозной жиже и содержания азота в почве в дальнейшем может привести к увеличению скорости процессов нитрификации и денитрификации и тем самым к увеличению последующих потерь  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$  (например, Dosch 1996). Таким образом, может быть целесообразно уменьшать содержание сухого вещества и углерода в жидком навозе на ранних стадиях операций по управлению навозом. Для этого могут быть использованы несколько вариантов обработки навоза, которые можно оценить в соответствии с требованиями, перечисленными на рис. IV.4 ниже.

Рис. IV.4

**Воздействие изменений состава навозной жижи посредством обработки навоза**



*Источник:* данный рисунок подготовлен для настоящего документа.

*Примечание:* стрелками обозначено ослабление (↓) или усиление (↑) соответствующего свойства. \*В случае, если сокращение выбросов достигается за счет естественно образующейся корки, а не других типов покрова.

231. Сформулированные в Плане действий Европейского союза цели по переходу к экономике замкнутого цикла<sup>20</sup> открывают возможности поощрения использования переработанных питательных веществ, способных заменить питательные вещества, содержащиеся в первичном сырье. Основную сложность представляет собой необходимость использовать такие переработанные питательные ресурсы, экологические характеристики которых тождественны или превосходят характеристики первичных питательных ресурсов, которые они заменяют. В Европейском союзе прилагаются усилия для разработки технологий переработки

<sup>20</sup> См. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>.

навоза, позволяющих получить безопасный и ценный с агрономической точки зрения ресурс, который будет иметь более широкое применение<sup>21</sup>.

232. Методы простой обработки навоза можно разделить на физические, химические или биологические (см. рис. IV.5 ниже, Bernal and others, 2015). Кроме того, существуют различные варианты/технологии для дальнейшей и более сложной переработки сырого или обработанного навоза с целью восстановления и улучшения питательных и органических веществ, содержащихся в различных видах навоза (см. рис. IV.6 ниже). Для навозной жижи или другого жидкого навоза, например полученного в результате анаэробного сбраживания и других биоотходов, все этапы обработки начинаются с механического разделения на:

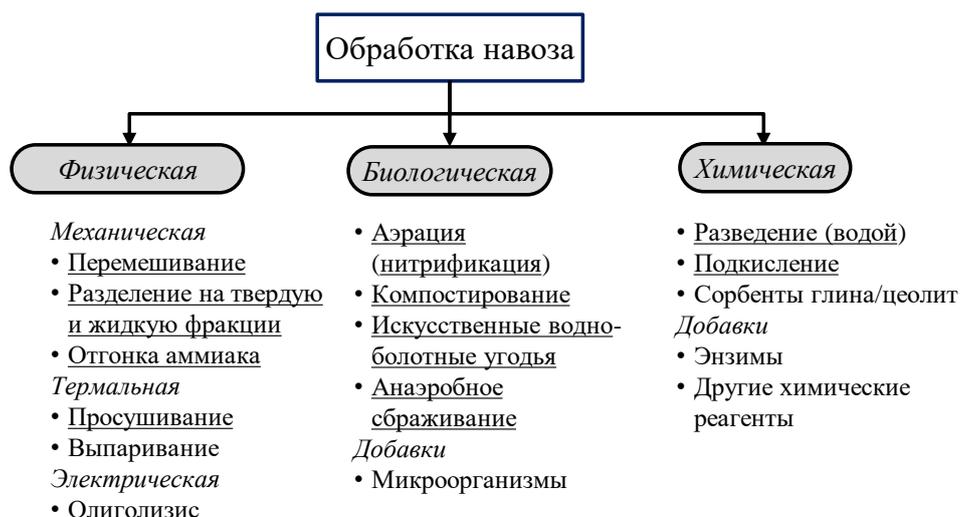
а) твердую фракцию, относительно богатую органическими азотом и фосфором;

б) жидкую фракцию с низким содержанием фосфора, но относительно высоким содержанием минеральных соединений азота и калия.

233. Различные методы простой обработки можно сочетать между собой. Это позволяет сочетать широкий спектр побочных продуктов, в результате чего распределение органического азота, аммиачного азота, фосфора, углерода и других питательных веществ сильно варьируется, что необходимо учитывать при работе с различными фракциями.

Рис. IV.5

#### Варианты простой обработки навоза



*Источник:* данный рисунок подготовлен для настоящего документа.

*Примечание:* технологии, выделенные подчеркиванием, широко и в полном объеме применяются в животноводческих (в основном свиноводческих) хозяйствах ряда регионов; остальные — применяются редко или только на экспериментальной/пилотной основе, в настоящем документе они далее не рассматриваются в связи с отсутствием на данный момент экспериментального подтверждения концепции и документации.

234. Жидкая фаза может подвергаться дополнительной обработке. Для экономии воды без увеличения количества азота, попадающего в почву, следуя концепции замкнутого цикла воды, часто проводятся несколько последовательных обработок жидкой фазы, чтобы полученный продукт можно было использовать для фертигации. Например, на юге Испании создаются водно-болотные массивы, чтобы повторно использовать воду для орошения в районах, где ее не хватает. Помимо азота, на решение о выборе того или иного метода влияют многие другие характеристики, такие как: воздействие органического вещества; образование метана и других парниковых

<sup>21</sup> См. URL: <https://ec.europa.eu/jrc/en/research-topic/waste-and-recycling>.

газов; присутствие других питательных веществ; тип сельскохозяйственной системы; соленость; погодные условия; водный след (немаловажный фактор в странах Южной Европы).

235. Каждый из этих путей переработки и получаемые в результате продукты (см. рис. IV.6 ниже) имеет некоторые преимущества и недостатки, а чистые экологические выгоды/воздействие и экономические затраты/прибыль значительно отличаются. При определении приоритетности вариантов переработки необходимо учитывать ряд факторов (Jensen, 2013):

a) главной целью должна быть переработка питательных веществ, в основном азота и фосфора; азот потребляется в наибольших количествах, он дорог и его потребление сказывается на потреблении энергии и выбросах парниковых газов (ПГ), а фосфор — редкий и невозобновляемый ресурс, очень дорогостоящий;

b) разделение азота и фосфора на разные фракции, как правило, целесообразно, так как это позволяет более гибко и сбалансированно вносить удобрения в соответствии с потребностями различных культур;

c) желательно, чтобы при применении того или иного метода или комплекса методов также производилась энергия или потреблялось относительно небольшое количество энергии; соответственно, чистое производство энергии должно учитываться как по экологическим, так и по экономическим соображениям;

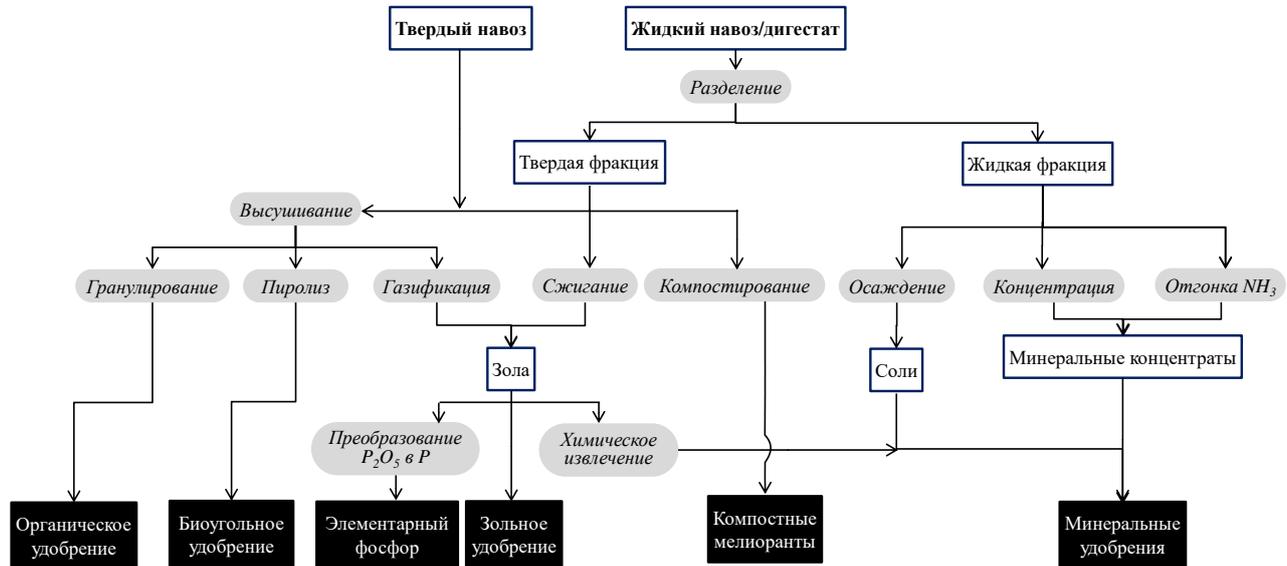
d) следует отдавать предпочтение решениям, реализуемым на месте, избегая чрезмерно высоких транспортных расходов и сопутствующего транспортировке воздействия; соответственно, региональные или централизованные решения оправданы только в том случае, если эффект масштаба за счет более высокой эффективности перевешивает негативные последствия транспортировки навоза на объект централизованной переработки;

e) качество конечного и побочных продуктов оценивается по-разному в зависимости от пользователя. Например, зола от сжигания навоза, в которой большая часть азота потеряна, не имеет ценности для хозяйства, производящего органическую продукцию, в то время как компост ценится высоко за его почвоулучшающие свойства и медленное высвобождение азота, даже если некоторая часть азота при этом теряется;

f) биоуголь и компост могут высоко цениться фруктовыми и виноградными хозяйствами в связи с их воздействием на водоудерживающую способность почвы и фиксацию питательных веществ, в то время как для традиционных растениеводческих хозяйств более ценными могут быть минеральные концентраты и соли. Производство восстановленных биоудобрений должно ориентироваться не на интересы производства (попытка решить проблему отходов), а на спрос (биоудобрения, нужные сельскохозяйственным производителям).

Рис. IV.6

**Варианты сочетания простой обработки с многоступенчатой переработкой навоза для восстановления и улучшения питательных веществ и энергетического баланса**



Источник: Jensen (2013), с изменениями.

Примечание: показанные варианты дают крайне различные биоудобрения. В настоящее время лишь немногие из них нашли полномасштабное коммерческое применение; остальные пока находятся на экспериментальном/пилотном этапе (и поэтому далее в настоящем документе не рассматриваются).

**2. Борьба с загрязнением при хранении, обработке и переработке навоза**

**Хранение навоза**

Управление навозом — мера 1: Крытое хранение навоза (сплошное покрытие и гидроизолированное основание)

236. Существует множество способов закрытого хранения навоза с использованием сплошного покрытия, в том числе в металлических или бетонных резервуарах со сплошными крышками, под плавающим покрытием в лагунах, в мешках для хранения жидкого навоза, и при условии соблюдения технологии в большинстве случаев выбросы аммиака при хранении навоза такими способами незначительны (Принцип 14). Более подробная информация об этих системах приводится в Bittman and others (2014). Закрытому хранению твердого навоза (например, в животноводческих и птицеводческих хозяйствах), например под полиэтиленовой пленкой, уделяется меньше внимания. За типовую систему принимается открытое хранение, в том числе на площадках с водонепроницаемой поверхностью, что указывает на целесообразность использования гидроизолированного основания для уменьшения выщелачивания нитратов (см. Управление навозом — мера 5).

Таблица IV.25

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 1 в области управления навозом**

Форма азота	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub>	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	3	3	1	3	1
Степень воздействия	↓↓	~	?	↓↓	↓↓	↓↓

*Управление навозом — мера 2: Крытое хранение жидкого навоза (естественно образующаяся корка и гидроизолированное основание)*

237. При высоком содержании сухого вещества в жидком навозе при хранении на поверхности может образовываться естественная корка, в связи с чем выбросы аммиака значительно сокращаются (Bittman and others, 2014). В целом считается, что образование корки влияет на выделение газа несколькими путями:

- a) повышенное сопротивление массообмену (Olesen and Sommer, 1993);
- b) окисление  $\text{NH}_3$  (Nielsen and others, 2010) и  $\text{CH}_4$  (Petersen and others, 2005); и
- c) образование  $\text{N}_2\text{O}$ , связанное с нитрификацией и денитрификацией, на границах раздела жидкость — воздух вокруг заполненных воздухом образующихся в корке пор (Petersen and Miller, 2006).

238. В ходе своей жизнедеятельности присутствующие в корке микроорганизмы потребляют аммиак и  $\text{CH}_4$ , что снижает выбросы (Petersen and Ambus, 2006; Nielsen and others, 2010), однако выбросы  $\text{N}_2\text{O}$  могут возрасти (van der Zaag and others, 2009). Комплексная оценка имеющихся на сегодняшний день знаний о последствиях естественного образования корки приводится в Kupper and others (2020). За типовую систему принимается открытое хранение, в том числе на водопроницаемых основаниях, что указывает на целесообразность устройства гидроизолированного основания для уменьшения выщелачивания нитратов (см. Управление навозом — мера 5).

Таблица IV.26

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 2 в области управления навозом**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	3	3	1	3	2
Степень воздействия	↓	↑?	?	↓↓	~	↓

*Управление навозом — мера 3: Крытое хранение твердого навоза (добавление сорбентов)*

239. Выбросы аммиака можно значительно снизить за счет укрытия твердых органических удобрений такими материалами, как торф, глина, цеолит и фосфогипс. Эта технология имеет целью предотвратить контакт с воздухом поверхностей, с которых происходит выброс  $\text{NH}_3$ , особенно при их укрытии сорбентами аммония (Принцип 15). В Lukin and others (2014) сделан вывод о том, что суммарная эмиссия  $\text{NH}_3$  от помета составила 5,9 % при укрытии помета торфом, 4,7 % — глиной, 1,3 % — цеолитами и 16,9 % — фосфогипсом. Процентные значения приводятся по отношению к эмиссии  $\text{NH}_3$  в контрольном варианте без укрытия. Использование простейших материалов для укрытия органических удобрений позволяет существенно сократить выбросы  $\text{NH}_3$  в атмосферу (Lukin and others, 2014). Необходимо разработать протоколы, в которых будет определена минимальная толщина для каждого типа добавляемого материала. Необходимы также новые исследования для оценки влияния на выбросы  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$  и  $\text{N}_2$ . В отсутствие гидроизолированного основания при таком подходе существует риск значительного выщелачивания нитратов. Сочетание мер 3 и 5 в области управления навозом позволяет снизить как выбросы  $\text{N}_T$  в атмосферу, так и потери при выщелачивании в воду.

Таблица IV.27

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 3 в области управления навозом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	3	3	3	3	2
Степень воздействия	↓↓	?	?	~	?	↓

*Управление навозом — мера 4: Хранение твердого навоза в сухих условиях*

240. Простое хранение навоза в сухом и укрытом от дождя месте также позволяет сократить выбросы азота в виде химически активных форм азота и молекулярного азота  $N_2$ . Это еще более важно в случае высушенной подстилки для птиц: хранение такого помета в сухости и укрытым от дождя помогает избежать гидролиза мочевой кислоты с образованием аммиака. Вместе с тем птичья подстилка обладает гигроскопическими свойствами и при высокой атмосферной влажности будет выделять некоторое количество аммиака, даже если она защищена от дождя (например, Elliot and Collins, 1982). Обеспечение сухости твердого навоза во время хранения сводит к минимуму минерализацию и денитрификацию, которые приводят к выбросам  $N_2O$ ,  $NO_x$  и  $N_2$ , а также к снижению выщелачивания нитратов и других форм  $N_r$ . За типовую систему принимается открытое хранение, в том числе на водонепроницаемых поверхностях, что указывает на целесообразность хранения в сухом состоянии для уменьшения выщелачивания нитратов (см. Управление навозом — мера 5).

Таблица IV.28

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 4 в области управления навозом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	2	2	2	2	2	1
Степень воздействия	↓	~/↓	↓	↓	↓	↓ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Простое хранение в сухих условиях наиболее эффективно для сухой птичьей подстилки, что позволяет избежать гидролиза мочевой кислоты и связанных с ним микробных процессов.

*Управление навозом — мера 5: Хранение твердого навоза на твердом бетонном основании со стенками*

241. Вложения в эту технологию оправданы необходимостью сокращения выщелачивания нитратов и других форм  $N_r$  путем предотвращения стоков и инфильтрации в почву. Преимущество метода заключается в низком уровне затрат, однако при его применении возникает риск значительных выбросов  $NH_3$ , а кроме того, он не позволяет подавить процессы нитрификации и денитрификации, которые способствуют выбросам  $N_2O$ ,  $NO_x$  и  $N_2$ . За типовую систему принимается открытое хранение, в том числе на водонепроницаемых основаниях, что указывает на целесообразность устройства гидроизолированного основания для уменьшения выщелачивания нитратов. Хранение твердого навоза на бетонированных площадках считается надлежащей сельскохозяйственной практикой с точки зрения борьбы с загрязнением нитратами, но никак не содействует сокращению выбросов  $NH_3$ .

Таблица IV.29

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 5 в области управления навозом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3	3	3	1	3	2
Степень воздействия	~	~	~	↓ <sup>a</sup>	~	↓ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Данный подход можно считать более целесообразным по сравнению с открытым хранением твердого навоза, однако возникает риск существенных выбросов других форм  $N_1$  и  $N_2$ .

**Меры по простой обработке навоза**

*Управление навозом — мера 6: Перемешивание жидкого навоза (при хранении)*

242. Перемешивание жидкого навоза при хранении является одним из наиболее часто применяемых методов обработки навоза. Перемешивание позволяет гомогенизировать навоз, и как правило это делается незадолго до его внесения в почву для более равномерного распределения питательных веществ по всему полю (полям), в которое вывозится навозная жижа из навозохранилища. Никаких дополнительных полезных свойств перемешанная навозная жижа по сравнению с непере­мешанной не приобретает. Содержание сухого вещества и углерода не уменьшается, соотношение C:N не меняется. Существенных изменений в выбросах  $N_2O$  или  $CH_4$  не происходит, однако зачастую может увеличиваться уровень выбросов  $NH_3$ , в зависимости от интенсивности и времени перемешивания (перемешивание, как правило, приводит к увеличению pH за счет увеличения потерь  $CO_2$  из жидкого навоза), ввиду чего эту операцию следует производить непосредственно перед внесением.

Таблица IV.30

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 6 в области управления навозом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3	3	3	3	3	3
Степень воздействия	~/(↑)	~	~	~	~	~

*Управление навозом — мера 7: Адсорбция аммония, содержащегося в жидком навозе*

243. Добавки к жидкому навозу могут иметь химический, физический или биологический принцип действия. При внесении минеральных добавок глины/цеолита наблюдалась адсорбция  $NH_4-N$ , соответственно они могут снижать потери  $NH_3$ . Однако подобный эффект может быть достигнут только при добавлении большого объема материала; например, было показано, что для адсорбции 55 %  $NH_4-N$  на  $m^3$  жидкого навоза необходимо внести 25 кг цеолита (Kocatürk and others, 2017, 2019). В большинстве животноводческих хозяйств внесение в жидкий навоз столь большого объема добавок логистически невозможно и экономически невыгодно. Также уменьшать вбросы  $NH_3$  из хранимого навоза можно путем добавления биоугля.

Таблица IV.31

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 7 в области управления навозом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	2	3	3	3	3	2
Степень воздействия	↓	? <sup>a</sup>	? <sup>a</sup>	? <sup>a</sup>	? <sup>a</sup>	↓

<sup>a</sup> Воздействие сорбентов аммония, вносимых в хранимый жидкий навоз, на потери  $N_2O$ ,  $NO_x$ ,  $NO_3^-$  и  $N_2$  пока не определено.

*Управление навозом — мера 8: Подкисление жидкого навоза (при хранении)*

244. Очевидным способом минимизации выбросов аммиака из хранимого жидкого навоза является снижение pH путем добавления сильных кислот или других подкисляющих веществ. Это может производиться также в помещении, в котором содержатся животные (Содержание в помещениях — мера 8). Чтобы получить от этой меры максимально полную отдачу, необходимо обеспечить поддержание низкого pH. Жидкий навоз с достаточно низким pH будет выделять также меньше метана. Это решение с 2010 года используется на животноводческих предприятиях в таких странах, как Дания (к 2018 году около 15–20 % вносимой в качестве удобрения навозной жижи в Дании было подкислено; Birkmose, личное сообщение), а его высокая эффективность в части минимизации выбросов  $NH_3$  зафиксирована во многих исследованиях (см. обзор в Fangueiro and others, 2015): выбросы можно сократить на более чем 80 %. Чаще всего жидкий навоз подкисляется серной кислотой (наиболее дешевая кислота, производимая промышленным способом; кроме того, добавленный сульфат выступает немаловажным источником питательных веществ для сельскохозяйственных культур), хотя могут использоваться и другие кислоты. Кроме того, подкисление очень эффективно снижает образование метана до 67–87 % (Petersen and others, 2012). Подавление процессов нитрификации и денитрификации снижает потенциал выбросов  $N_2O$  и  $N_2$ , хотя эффективность данного метода в этой части требует дальнейшего подтверждения результатами исследований. В одной из последних доработок этого метода  $N_2$  в процессе плазменного электролиза окисляется до образования NO, а затем диоксида азота ( $N_2O$ ), который в навозе преобразуется в азотную кислоту ( $HNO_3$ ). Таким образом, при подкислении жидкого навоза одновременно повышается его питательная ценность (Graves and others, 2019). Чтобы полностью оценить этот вариант метода необходимы дополнительные исследования.

245. Затраты на системы подкисления на месте (в животноводческом хозяйстве) могут быть выше, чем затраты на подкисление во время внесения (Управление навозом — мера 9), однако они компенсируются дополнительными положительными эффектами, в частности: улучшение качества воздуха в помещениях благотворно сказывается на животных и персонале, что в свою очередь может влиять на продуктивность; сохранение большего количества азота, содержащегося в жидком навозе, в масштабе всей цепочки операций по управлению навозом; сопутствующая экономия в части затрат на удобрения.

Таблица IV.32

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 8 в области управления навозом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	2	2	3 <sup>a</sup>	2	1 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓↓	↓	~/↓?	~ <sup>a</sup>	↓	↓↓ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Хотя данных о том, что эта мера позволяет напрямую снизить  $NO_3^-$ , не имеется, в той степени, в которой снижение потерь  $NH_3$  позволяет заместить неорганические удобрения образовавшимся таким образом связанным азотом (например, когда регулирующие удобрения нормы требуют учитывать улучшенные удобрительные свойства), она может способствовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет снижения потерь  $N_f$  и  $N_2$  в более широком плане.

*Управление навозом — мера 9: Аэрация жидкого навоза*

246. В процессе аэрации через жидкий навоз быстро пропускается кислород, что позволяет развиваться аэробным микроорганизмам. Окисление органического вещества до  $CO_2$  и  $H_2O$  увеличивается, а образование и выбросы  $CH_4$  тем самым снижаются. Пахучие соединения разлагаются. Содержание сухого вещества в жидком навозе снижается. Таким образом, навоз нужно меньше перемешивать, а его технические свойства зачастую улучшаются. Однако для качественной аэрации на тонну навозной жижи необходимо 200 м<sup>3</sup> кислорода (Burton 1998).

247. Аэрация увеличивает выбросы  $NH_3$  и потребление энергии. Потенциальные выбросы  $NO_x$  также увеличиваются, поскольку повышенная доступность кислорода способствует нитрификации, а последующее повышение доступности нитратов может увеличить другие потери окисленных  $N_f$  и активизировать процесс денитрификации. Объем такого увеличения количественно оценен только в нескольких исследованиях (Amon and others, 2006), соответственно для полной оценки необходимы дополнительные исследования. В настоящем контексте активизация денитрификации с образованием  $N_2$  рассматривается как нерациональное расходование имеющихся ресурсов  $N_f$ .

Таблица IV.33

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 9 в области управления навозом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3	3	3	3	3	3
Степень воздействия	↑↑	↑↑	↑?	?	?	↑↑

*Управление навозом — мера 10: Механическое разделение твердой и жидкой фракций жидкого навоза*

248. В результате сепарирования происходит механическое отделение твердого вещества от жидкости с образованием двух фракций: жидкой, с относительно низким по сравнению с жидким навозом содержанием сухого вещества, и твердой, которую можно хранить в кучах. Энергозатраты при разделении на фракции относительно низки, однако зависят от используемой для этого технологии. Содержание сухого вещества в жидкой фракции снижается на 40–45 % и на столько же повышается в твердой фракции. Содержание углерода в жидкости как правило снижается на 45–50 %, при этом соотношение C:N в жидкости уменьшается с примерно 10:1 до 5:1 (Amon 1995; Sommer and others, 2013). Поскольку содержание углерода в

жидком навозе уменьшается, в нем снижается активность микроорганизмов и при его хранении разлагается меньше органического вещества. Однако в случае твердой фракции, в зависимости от условий хранения, может происходить обратный процесс.

249. После удаления твердых частиц образование корки и осаждение в жидкой фракции по сравнению с необработанным жидким навозом идет менее активно. Таким образом, для гомогенизации навозной жижи перед внесением в почву ее можно перемешивать не столь интенсивно. С другой стороны, в случае хранения навозной жижи без крышки вероятность потерь аммиака увеличивается. Поэтому при хранении жидкой фракции необходимо применять другие меры по сокращению выбросов (Управление навозом — меры 1, 2 или 8). Это также упрощает применение низкоэмиссионных технологий внесения навоза, поскольку отделенная навозная жижа менее вязкая и легче проходит через шланги при внесении способом ленточного разбрасывания (Owusu-Twuma and others, 2017). Навозную жижу с очень низким содержанием сухого вещества можно разбрызгивать с помощью простых насадок-разбрызгивателей, установленных на штанге, которые можно применять при уклоне >10 %, что невозможно при использовании других методов ленточного разбрасывания. Кроме того, отделенная жидкая фракция имеет низкую вязкость и быстро проникает в почву. Благодаря этому растения загрязняются меньше, а выбросы аммиака в результате разбрызгивания жидкой фракции, как правило, снижаются. Таким образом, разделение жидкого навоза на фракции позволяет добиться существенного сокращения выбросов аммиака в жидкой фазе, особенно после ее внесения в почву (например, Amon and others, 2006).

250. Жидкая фракция, полученная после разделения жидкого навоза на фракции, имеет низкое соотношение C:N, что снижает потенциал как иммобилизации азота в почве микроорганизмами, так и выбросов N<sub>2</sub>O. Таким образом, доступность азота для растений в жидкой фракции более предсказуема, а ее оценку при оценке необходимого внесения удобрений в соответствии с потребностями растений в питательных веществах можно провести более точно. В Dosch (1996) было исследовано внесение в качестве удобрений необработанной навозной жижи и навозной жижи после разделения на фракции; в результате исследования для необработанной навозной жижи были зафиксированы значительно более высокие показатели денитрификации. Сепарация жидкой фракции, с другой стороны, позволила значительно повысить урожайность. Однако во избежание повышенных выбросов аммиака из твердой фракции при ее хранении необходимо принимать соответствующие меры. Кроме того, без надлежащей обработки твердая фракция может стать источником выбросов метана. Если же твердая фракция используется в качестве сырья для производства биогаза, то этот метан может быть рекуперирован и утилизирован как возобновляемый источник энергии. После внесения в почву твердая фракция служит, главным образом, в качестве материала, улучшающего свойства почвы и азотным удобрением контролируемого действия.

251. Разделение жидкого навоза на фракции отвечает большинству требований надлежащей обработки навоза. Дальнейшее снижение затрат может быть достигнуто за счет более широкого распространения данной технологии, наличия на рынке большего числа сепараторов и их большей доступности для сельхозпроизводителей. Поскольку удобрительные качества навозной жижи в случае выделения жидкой фракции улучшаются, это позволяет снизить объем использования минеральных азотных удобрений. Жидкая фракция может вноситься в почву с уже растущими культурами при помощи очень простых и недорогих разбрызгивателей (например, буксируемые шланги, см. главу V) с высокой эффективностью поглощения и экономией за счет замещения удобрений. В случае применения этого метода необходимо с крайней тщательностью подходить к обеспечению надлежащего хранения, обработки и использования твердой фракции; в ходе этих процессов должен гарантироваться низкий уровень выбросов (например, Field Measure 11), чтобы не свести на нет положительные результаты, полученные в ходе использования жидкой фракции. В качестве альтернативы твердую фракцию можно использовать как сырье для анаэробного сбраживания питательных веществ (Управление навозом — мера 11) с восстановлением питательных веществ.

Таблица IV.34

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 10 в области управления навозом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	½	2	3	3	2	2 <sup>b</sup>
Степень воздействия	↓↓	↓	? <sup>a</sup>	? <sup>a</sup>	↓	↓ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Хотя данных о том, что эта мера позволяет напрямую снизить  $NO_x$  и  $NO_3^-$ , не имеется, в той степени, в которой снижение потерь  $NH_3$  позволяют заместить неорганические удобрения образовавшимся таким образом связанным азотом, она может способствовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет снижения потерь  $N_f$  и  $N_2$  в более широком плане.

<sup>b</sup> Основной упор в этом методе делается на сокращение выбросов от жидкой фракции, в которой содержится большая часть аммиачного азота, что подразумевает: а) необходимость хранения жидкой фракции под крышкой или ее подкисления; б) возможность сокращения выбросов  $NH_3$  в процессе разбрызгивания жидкой фракции (глава V). Для обеспечения максимальной эффективности метода необходимо также обеспечить надлежащее хранение и использование твердой фракции (например, закрытое хранение, прямое внесение в почву или анаэробное сбраживание).

*Управление навозом — мера 11: Анаэробное сбраживание*

252. Анаэробное сбраживание навоза животных в настоящее время осуществляется в основном для целей производства биоэнергии. Поэтому навоз с улучшенными качествами обычно рассматривается как «побочный продукт» анаэробного сбраживания. Однако в сочетании с методами рекуперации питательных веществ (см. рис. IV.6 выше; например, Рекуперация питательных веществ — меры 3–5) регулирование содержания питательных веществ можно считать одной из полностью интегрированных ключевых задач при анаэробном сбраживании. Добавочная ценность продуктов анаэробного сбраживания (произведенный биогаз, доступные питательные вещества) может приносить сельхозпроизводителям дополнительный доход, который они могут направить на инвестиции в свое хозяйство (например, на внедрение надлежащих методов хранения и внесения навоза).

253. Производство биогаза из навоза животных путем анаэробного сбраживания осуществляется таким образом, чтобы максимизировать выход биометана. В отсутствие системы рекуперации биогаза в ходе хранения навоза следует насколько возможно ограничивать непреднамеренное анаэробное разложение органических веществ с образованием метана, чтобы предотвратить выбросы в атмосферу этого сильного ПГ. Такой подход также максимально увеличивает доступность ресурсов для производства биогаза в дальнейшем, при появлении соответствующих мощностей. Для усиления сбраживания при анаэробном процессе навоз можно нагревать, что позволяет увеличить производство метана, который может использоваться в различных системах (например, при комбинированной выработке тепло- и электроэнергии). Анаэробное сбраживание не только сокращает выбросы метана при последующем хранении дигестата; выработанная энергия, как правило, заменяет потребление ископаемого топлива. Оба эти фактора позволяют сократить антропогенные выбросы парниковых газов.

254. В результате анаэробного сбраживания содержание в навозе углерода и сухого вещества уменьшается примерно на 50 % (Amon and Voxberger 2000). Содержание аммония и pH в сброженном жидком навозе выше, чем в необработанном. Это увеличивает возможные выбросы  $NH_3$  при его последующем хранении увеличивается. Поэтому сброженный жидкий навоз должен храниться в закрытых навозохранилищах. Они должны быть подключены к газопроводу установки для производства биогаза, так как метан продолжает образовываться и после окончания основной фазы сбраживания в подогреваемом метатенке.

255. Благодаря снижению содержанию сухого вещества образовавшийся при производстве биогаза жидкий навоз быстрее проникает в почву, что, как правило, сокращает выбросы аммиака после его внесения. Однако повышенное содержание  $\text{NH}_4^+$  и повышенный pH могут увеличивать потери аммиака, особенно после внесения в почву. Поэтому вносить такую навозную жижу настоятельно рекомендуется низкоэмиссионными методами вблизи или ниже поверхности почвы (например, ленточное разбрызгивание или инжекторный способ, глава V).

256. Следует отметить, что сам по себе процесс анаэробного сбраживания не сокращает выбросы  $\text{NH}_3$ , однако он дает возможность сокращать такие выбросы, поскольку для течения процесса сбраживания система должна быть закрытой. Аналогичным образом, при анаэробном сбраживании образуется дигестат с высоким содержанием TAN и низким содержанием сухого вещества, который проще применять для повышения эффективности использования азота растениями, чем навозную жижу или твердый навоз с высоким содержанием углерода. Т. е. анаэробное сбраживание дает дополнительные возможности для сокращения выбросов  $\text{NH}_3$ , но фактическое сокращение будет зависеть от применения соответствующего комплекса мер. Таким образом, комбинированное применение анаэробного сбраживания (снижение содержания сухого вещества, повышение содержания  $\text{NH}_4^+$  и pH), закрытое хранение до использования и внесение в почву низкоэмиссионными методами (например, с использованием буксируемых шлангов, инжекторные способы) значительно снижает выбросы  $\text{NH}_3$ . Кроме того, возможно снижение уровня иммобилизации азота и потерь  $\text{N}_2\text{O}$  в сравнении с необработанным жидким навозом, благодаря удалению в процессе анаэробного сбраживания легко разлагающихся органических веществ. Энергозатраты на перекачку и перемешивание значительно снижаются благодаря снижению содержания сухого вещества. Таким образом, в сочетании с соответствующими методами низкоэмиссионного разбрызгивания дигестата, процесс анаэробного сбраживания обладает множеством преимуществ. Кроме того, он дает возможность дальнейшей переработки в виде более сложных форм рекуперации питательных веществ, включая осаждение питательных веществ, концентрацию и отгонку аммиака (см. рис. IV.6 выше); Рекуперация питательных веществ — меры 3–5).

Таблица IV.35

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 11 в области управления навозом**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1
Степень воздействия	↓↓ <sup>a</sup>	↓ <sup>a</sup>	? <sup>b</sup>	↓↓ <sup>b</sup>	↓ <sup>a</sup>	↓↓

<sup>a</sup> Категория ЕЭК ООН и степень воздействия приводятся исходя из того, что анаэробное сбраживание осуществляется в сочетании с низкоэмиссионными методами внесения дигестата в почву (например, ленточное разбрызгивание, инжекторные способы, глава V). В противном случае в связи с высоким pH получаемого в результате анаэробного сбраживания дигестата выбросы аммиака могут увеличиться (↑↑).

<sup>b</sup> Несмотря на отсутствие данных, подтверждающих, что эта мера позволяет напрямую снизить  $\text{NO}_x$ , в той степени, в которой снижение потерь  $\text{NH}_3$  и  $\text{N}_2$  позволяют заместить неорганические удобрения образовавшимся таким образом связанным азотом, она может способствовать повышению эффективности и степени циркулярности системы за счет уменьшения потерь  $\text{N}_r$  в более широком плане. Требование об устройстве гидроизолированного основания приводит к уменьшению выщелачивания нитратов по сравнению с хранением/обработкой навоза на водопроницаемой поверхности.

*Управление навозом — мера 12: Компостирование навоза*

257. Компостирование навоза производится с целью получения стабильного биоудобрения без запаха, с меньшим содержанием влаги, но при этом сохраняющего большую часть исходных питательных веществ и не содержащего болезнетворных микроорганизмов и семян (Jensen, 2013). Компостирование значительно снижает массу (в результате испарения воды и разложения летучих твердых веществ с выделением CO<sub>2</sub>) и, следовательно, транспортные расходы. В то же время полностью избежать некоторой потери содержащегося в навозе азота в форме NH<sub>3</sub> сложно, при этом данный процесс сопровождается выбросами парниковых газов и может приводить к увеличению выбросов N<sub>2</sub>O и CH<sub>4</sub>, помимо выбросов NO<sub>x</sub> и N<sub>2</sub> (Chowdhury and others, 2014). Удобрительные свойства компоста в части содержания азота зачастую существенно хуже, чем свойства азотсодержащих компонентов навоза, из которых он производится, что в значительной степени является результатом сопутствующих выбросов NH<sub>3</sub> и N<sub>2</sub> (Jensen, 2013). Помимо этого, компостирование на пористых поверхностях почвы может сопровождаться значительным выщелачиванием, в том числе NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и других соединений N<sub>r</sub>. Компостирование, как правило, не требует больших затрат, однако требует определенного пространства и энергозатрат. В связи с этим компостирование обычно не рекомендуется как способ уменьшения потерь азота, однако может быть предпочтительным по другим критериям (например, уменьшение объема и веса, стабильность полученного компоста, уменьшение неприятного запаха, улучшение товарных качеств компоста и свойств почвы).

Таблица IV.36

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 12 в области управления навозом**

Форма азота	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub>	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3	3	3	3 (2)	3	2
Степень воздействия	↑	~↑	↑	↑ (↓ <sup>a</sup> )	↑	~ <sup>b</sup>

<sup>a</sup> При условии компостирования на гидроизолированной площадке и с рекуперацией компостного фильтрата.

<sup>b</sup> Более благоприятная общая оценка по N<sub>r</sub> может быть достигнута при «контейнером компостировании» в сочетании с кислотной очисткой отходящего воздуха (см. «Меры по рекуперации питательных веществ»); в определенных условиях эти методы могут быть использованы для управления биологическими опасностями, хотя они значительно увеличивают затраты на осуществление.

258. Помимо этих простых вариантов обработки навоза, существуют примеры использования для обработки жидкого навоза искусственных водно-болотных угодий (см. Управление ландшафтом — мера 5).

**Глубокая переработка навоза и рекуперация питательных веществ**

*Рекуперация питательных веществ — мера 1: Высушивание и гранулирование твердого вещества, содержащегося в навозе*

259. Высушивание и гранулирование твердого навоза, жидкого навоза или твердых веществ, образующихся в результате сбраживания, позволяют получить более стабильное биоудобрение, не обладающее запахом. Высушивание — процесс энергоемкий и, следовательно, относительно затратный, если только в хозяйстве нет доступной и дешевой избыточной энергии (например, от двигателя комбинированного производства и тепла на установке по производству биогаза). При этом процессе неизбежны повышенные потери аммиака, если отсутствует фильтрация или очистка отходящего воздуха и рекуперация или твердые частицы не подкисляются перед сушкой. Высушивание, как правило, сочетается с процессом гранулирования для

облегчения погрузочно-разгрузочных операций. Гранулы можно продавать как органическое вещество и почвенный мелиорант, богатый фтором; при подкислении перед высушиванием получаемый продукт может быть также богат доступным для культур азотом (Pantelopoulos and others, 2017).

Таблица IV.37

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 1 в области рекуперации питательных веществ**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3 (1 <sup>a</sup> )	3	3	3	3	2
Степень воздействия	↑ (↓ <sup>a</sup> )	~?	~?	~?	~?	~↑ (↓ <sup>a</sup> )

<sup>a</sup> Данный метод приводит к увеличению выбросов  $NH_3$ , если только он не сочетается с подкислением жидкого навоза или очисткой/отгонкой (Меры по рекуперации питательных веществ 4 и 5) отходящего воздуха.

*Рекуперация питательных веществ — мера 2: Сжигание, газификация или пиролиз*

260. Сжигание, термическая газификация или пиролиз твердых частиц навоза и дигестата могут использоваться для получения полезной энергии для производства тепла и/или электроэнергии. Однако в настоящее время применение этого метода приводит к практически полной потере содержащегося в навозе азота, который преобразуется в газообразный  $N_2$ ,  $NO_x$  и  $NH_3$ . Доступные передовые технологии (например, селективное некаталитическое восстановление), основаны на процессе денитрификации этих азотосодержащих газов до  $N_2$ . Пока не будут созданы системы, обеспечивающие снижение до минимума образование  $N_2$  и рекуперацию азотосодержащих газов, эту меру нельзя рассматривать как эффективную с точки зрения уменьшения общих потерь азота.

261. Одновременно с этим при использовании этой технологии образуются зола или остатки биоугля. Зола содержит нелетучие питательные вещества в концентрированном в сопоставлении с твердым веществом состоянии. Она может использоваться в качестве зольного мелиоранта почвы, богатого фтором и калием, или как биоудобрение. Доступность сохранившихся в золе питательных веществ, как правило, намного ниже, для питательных веществ в сыром навозе, в то время как биоуголь по этому показателю находится между золой и сырым навозом. Образующиеся в биоугле органические соединения весьма устойчивы к биологическому разложению и имеют очень большую удельную площадь поверхности, поскольку могут быть заряжены. Это означает, что такой биоуголь может использоваться в качестве почвенного мелиоранта с положительным воздействием на pH почвы и органическое вещество.

Таблица IV.38

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 2 в области рекуперации питательных веществ**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3 (2 <sup>a</sup> )	3	3	3	3	3 (2 <sup>a</sup> )
Степень воздействия	↑ (↓ <sup>a</sup> )	↑ (↓ <sup>a</sup> )	↑ (↓ <sup>a</sup> )	–	↑↑	↑↑

<sup>a</sup> Значения, указанные в скобках, отражают преимущества дополнительных мер контроля процесса (например, селективного (не)каталитического восстановления), позволяющих свести к минимуму выбросы  $NO_x$  и  $NH_3$ . Тем не менее используемые на сегодняшний день методы все еще увеличивают выбросы  $N_2$ , так что ресурс  $N_f$  в действительности расходуется

нерационально. Таким образом, этот метод в целом снижает системную эффективность использования азота и является одним из препятствий на пути успешного перехода к экономике замкнутого цикла в части использования азота. Для того чтобы увязать минимизацию образования  $N_2$  с эффективной рекуперацией азотосодержащих газов, необходимы дальнейшие разработки (Sutton and others, 2013).

*Рекуперация питательных веществ — мера 3: Осаждение азотосодержащих солей*

262. При соответствующих условиях (рН ~9, молярная доля 1:1:1 по  $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ , благоприятные физические условия осаждения) из жидкого навоза может осаждаться струвит ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ). Таким образом, осаждение струвита является одним из методов удаления и рекуперации из жидкого навоза как азота, так и фосфора. Этот метод был разработан для очистки сточных вод и позволяет удалять фосфор на более чем 70 %; он предлагается на рынке для станций очистки сточных вод, хотя пока еще не получил широкого применения. В случае навоза метод осаждения струвита особенно актуален для анаэробно сброживаемого жидкого навоза и жидкой фракции, полученной в результате отделения дигестата; в связи с этим в последнее десятилетие он активно исследовался, а благодаря его применению достигаются довольно высокие показатели эффективности удаления (56–93 %); более подробный обзор см. в Jensen, 2013). Метод, однако, эффективен только для азота в форме  $NH_4^+$ , и для соответствующего применения к жидкой форме навоза и дигестату нужны дополнительные исследования. Пока что во всем мире эксплуатируется лишь несколько промышленных установок, работающих на этой технологии. Основным преимуществом струвита является его высокая концентрация и сходство по физико-химическим свойствам с обычным минеральным азотным удобрением.

Таблица IV.39

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 3 в области рекуперации питательных веществ**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	2	3	3	2	2	2
Степень воздействия	↓ <sup>a</sup>	↔ <sup>a</sup>	↔ <sup>a</sup>	↓ <sup>a</sup>	↓ <sup>a</sup>	↓ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Приведенные в таблице сведения относятся только к осаждению струвита. Поскольку при этом подходе азотосодержащие реактивные соединения рекуперированы для повторного использования, можно ожидать общесистемного сокращения основных потерь  $NH_3$ ,  $NO_3^-$  и  $N_2$ . Однако фактическая эффективность метода еще не подтверждена. Данную меру можно рассматривать как один из путей сокращения общих потерь  $N_f$  и  $N_2$  посредством мобилизации рекуперации и повторного использования имеющихся ресурсов  $N_f$ .

*Рекуперация питательных веществ — мера 4: Концентрирование азотсодержащих солей и растворов*

263. Минеральные концентраты представляют собой растворы с высоким содержанием питательных веществ, которые могут быть получены путем ультрафильтрации, испарения или обратного осмоса жидкой фракции, полученной при разделении жидкого навоза, или дигестата. Эти минеральные концентраты (ретентат) могут прямо вноситься в почву, а образовавшуюся в качестве побочного продукта воду с низким содержанием питательных веществ (пермеат) можно без дополнительной обработки сбрасывать в поверхностные воды или в канализационную систему. Наибольший опыт применения этих технологий в Европе накоплен в животноводческих регионах Нидерландов и Бельгии, где несколько крупных централизованных заводов по переработке навоза используют целый ряд технологий в сочетании (например, анаэробное сброживание, разделение твердой и жидкой фракции, ультрафильтрация/обратный осмос/высушивание твердого вещества). При наличии возможности сведения к минимуму потерь может быть достигнута достаточно высокая экономия благодаря замещению минеральных удобрений минеральными концентратами, поскольку они схожи с представленными на рынке жидкими удобрениями, а почти все питательные вещества присутствуют в них в

минеральной, доступной для культур форме. Вместе с тем во избежание потерь  $\text{NH}_3$  в газообразной форме может потребоваться предварительное подкисление или внесение концентрата в почву инжекторным методом (Jensen, 2013). Сегодня применение таких технологий требует высоких энергозатрат, поэтому задача на будущее должна включать в себя повышение энергоэффективности при более низких энергозатратах на килограмм восстановленного азота и других питательных веществ. Поскольку данные методы пока только изучаются, в настоящее время категории ЕЭК ООН для них не определены (например, категория 3 до того момента, когда будет возможно дать им дальнейшую оценку).

*Рекуперация питательных веществ — мера 5: Отгонка аммиака*

264. Воздушная отгонка  $\text{NH}_3$  представляет собой процесс, в ходе которого жидкая фракция навоза после ее отделения от твердой контактирует с воздухом, в результате чего  $\text{NH}_3$  испаряется и удаляется газом. При «паровой отгонке» в качестве газоносителя аммиака вместо атмосферного воздуха можно использовать пар. Так как испарение происходит с поверхности жидкости, то нужно максимально увеличить ее площадь. Это может быть достигнуто в отпарной колонне с контактными устройствами со структурированной поверхностью, где жидкость растекается по контактному устройству тонким слоем, тем самым существенно увеличивая площадь ее поверхности. Массообмен при концентрации  $\text{NH}_3$  (aq) в жидкой фазе также увеличивается; таким образом, при повышении рН и/или температуры возрастает доля общего аммиачного азота в форме  $\text{NH}_3$  (aq) и увеличивается массообмен  $\text{NH}_3$  (Sommer and others, 2013). В результате данная технология в целом является относительно энергоемкой и дорогостоящей, хотя дешевая/бесплатная избыточная энергия, например от биогазовой теплоэлектростанции может снизить затраты на энергию. В качестве альтернативы использование селективно-проницаемых мембранных контактных устройств при более низких температурах может оказаться более дешевым при условии недопущения загрязнения мембраны.

265. Аммиак, высвобождаемый из отпарной колонны для отгонки  $\text{NH}_3$  или из сушилки для навоза, можно собирать с помощью мокрой очистки кислотным раствором, как правило раствором серной кислоты, для получения сульфата аммония (наиболее распространенный метод). Также есть данные о примерах применения данного метода с использованием азотной кислоты для производства аммиачной селитры. Оба соединения могут служить сырьем для минеральных удобрений, что открывает возможность для реализации принципа экономики замкнутого цикла в рамках обязательства сектора по производству удобрений по использованию восстановленного и переработанного  $\text{N}_r$ . В целом эта технология хорошо известна и, как правило, эффективна. Основные недостатки: относительно низкая концентрация азота в очищающей жидкости, которая может получена (и, следовательно, высокие логистические издержки); требования к качеству при выведении очищающей жидкости на рынок сырья для производства удобрений.

Таблица IV.40

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия меры 5 в области рекуперации питательных веществ**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓ <sup>a</sup>	↓ <sup>a</sup>	↓ <sup>a</sup>	↓ <sup>a</sup>	↓ <sup>a</sup>	↓↓ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Данную меру можно рассматривать как инструмент сокращения общих потерь  $\text{N}_r$  и  $\text{N}_2$  посредством активизации рекуперации и повторного использования имеющихся ресурсов  $\text{N}_r$ . Таким образом, восстановленные ресурсы  $\text{N}_r$  позволяют заменить новые неорганические удобрения, производимые за счет азота, связываемого промышленным способом, повышая тем самым эффективность и циркулярность системы.

## **Г. Передовая практика и приоритетные меры**

266. Выбор передовой практики и приоритетов при определении мер по борьбе с загрязнением/смягчению его последствий должны основываться на следующих критериях:

- a) простота применения;
- b) эффективность;
- c) воздействие на выбросы в окружающую среду;
- d) вторичные последствия;
- e) контролируемость;
- f) экономичность.

267. В приведенном ниже перечне перечислены приоритетные меры, отвечающие этим критериям.

### **Кормление сельскохозяйственных животных**

268. Следующие приоритетные меры в области кормления сельскохозяйственных животных позволяют сократить потери азота:

- a) недопущение образования излишков азота с самых первых операций по управлению навозом;
- b) адаптация рациона питания животных в зависимости от их продуктивности (в соответствии с существующими руководящими указаниями, содержащимися в Рамочном кодексе ЕЭК ООН по выбросам аммиака, Bittman and others, 2014);
- c) адаптация рациона питания животных, с тем чтобы большая часть азота выделялась не с мочой, а фекалиями;
- d) для молочного скота:
  - i) снижение содержания сырого протеина в рационе;
  - ii) адаптация рациона и системы молочного производства с учетом местных условий;
  - iii) увеличение надоев при умеренном уровне использования концентратов;
  - iv) увеличение числа дойных циклов на одну корову;
- e) для свиней:
  - i) снижение содержания сырого протеина в рационе;
  - ii) многофазовое кормление;
  - iii) более широкое использование пищевых отходов (в том числе от переработки и розничной сети) как способ сокращения выбросов в атмосферу на начальных и конечных этапах производства.

### **Содержание сельскохозяйственных животных в помещениях**

269. Следующие приоритетные меры в области содержания животных в помещениях позволяют сократить потери азота:

- a) снижение температуры в животноводческом помещении;
- b) уменьшение площади поверхностей, с которых происходят выбросы, уменьшение площади загрязненных поверхностей;
- c) уменьшение воздухопотока над загрязненными поверхностями;
- d) использование добавок (например, подкисление);

- e) частое удаление жидкого навоза во внешнее навозохранилище;
- f) в долгосрочной перспективе: автоматизированное управление в свинарниках с оптимизированной вентиляцией (открытое содержание) или очисткой отходящего воздуха (закрытое содержание), немедленное сепарирование компонентов мочи и фекалий, подкисление жидкого навоза (свиней и крупного рогатого скота) на месте.

### **Хранение, обработка и переработка навоза**

270. Следующие приоритетные меры в области хранения, обработки и переработки навоза позволяют сократить потери азота и активизировать рекуперацию и повторное использования азота:

- a) хранение твердого навоза вне помещения, на сплошном бетонном основании в сухом/крытом месте;
- b) хранение жидкого навоза в плотно закрытых резервуарах либо под сплошным покрытием, либо под достаточно плотной естественно образующейся коркой;
- c) обработка навоза в случае необходимости с целью:
  - i) гомогенизации содержания питательных веществ для их более равномерного распределения по полю, чтобы обеспечить эффективное использование доступных питательных ресурсов для роста растений;
  - ii) снижения содержания сухого вещества в жидком навозе, например путем разделения твердой и жидкой фракций, для усиления инфильтрации в почву и снижения потерь  $\text{NH}_3$ ;
  - iii) увеличения содержания  $\text{NH}_4^+$  в жидком навозе, чтобы обеспечить максимальную доступность для растений содержащегося в нем азота;
  - iv) снижения pH путем подкисления для уменьшения улетучивания  $\text{NH}_3$  и улучшения удобрительных свойств;
  - v) применения в случае необходимости методов обработки навоза, позволяющих обеспечить комбинированную рекуперацию энергии и питательных веществ, например анаэробного сбраживания.

271. Технологии глубокой переработки навоза для рекуперации азота и производства продуктов с улучшенными питательными свойствами из рециркулированного навоза, например высокотехнологичное сепарирование путем фильтрации, обратный осмос и обработка  $\text{NH}_3$  в скрубберах, высушивание навоза и содержащегося в дигестате твердого вещества для производства органических удобрений, следует применять там, где невозможно эффективно использовать другие методы. По возможности производство восстановленных биоудобрений должно быть ориентировано не на предложение (попытка решить проблему отходов), а на спрос (биоудобрения, нужные сельскохозяйственным производителям). Однако в таком случае возникает необходимость решения проблемы региональных излишков навоза, которые могут образовываться в результате присутствия в регионе крупных животноводческих хозяйств.

## **G. Выводы и вопросы для дальнейших исследований**

272. Очевидно, что система управления навозом влияет на объем выбросов  $\text{N}_r$  ( $\text{NH}_3$ , прямые и косвенные выбросы  $\text{N}_2\text{O}$ , выбросы  $\text{NO}_x$ , выщелачивание  $\text{NO}_3$ ) и  $\text{N}_2$ , а также  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ . Это относится к каждой операции в процессе управления навозом (Chadwick and others, 2011). Поскольку соответствующие газы, а также выщелачиваемый  $\text{N}_r$  образуются в результате деятельности микроорганизмов, содержание сухого вещества (СВ) и температура навоза и почвы являются ключевыми факторами при принятии решений в области управления навозом в хозяйстве, влияющими на величину потерь азота и выбросы парниковых газов. В отношении

уровней выбросов азота и парниковых газов на различных этапах управления навозом сохраняется некоторая неопределенность, и исследователи продолжают изучать взаимодействие факторов, действующих в ходе этих процессов, и факторов окружающей среды, воздействующих на выбросы. Конкретные методы сокращения выбросов азота и парниковых газов при содержании животных в помещениях и при хранении навоза включают в себя: оптимизацию рациона питания; низкоэмиссионные технологии содержания животных в помещениях; переработку навоза; рекуперацию питательных веществ. Для их осуществления используются следующие технологии: воздушные скрубберы; крытое хранение навоза; разделение жидкого навоза на фракции и анаэробное сбраживание; концентрирование азота; методы отгонки.

273. Действующее в регионе ЕЭК ООН законодательство позволяет находить беспроблемные для всех участвующих сторон решения, в то же время уменьшающие многочисленные формы загрязнения. Например, Директива Европейского союза по нитратам<sup>22</sup>, в соответствии с которой были разработаны планы действий для уязвимых к нитратам зон с целью предотвращения применения навоза животных, навозной жижи и птичьего помета (с высоким содержанием азота) осенью: данная практика позволяет снизить потери азота, а также прямые и косвенные потери N<sub>2</sub>O. Необходимо обратить особое внимание на то, чтобы применение законодательства не приводило к потенциальной «замене загрязнителей» (например, применение без соответствующей коррекции инжекторного метода внесения навозной жижи для снижения выбросов NH<sub>3</sub> с сопутствующим увеличением выбросов N<sub>2</sub>O, без изменения вводимого количества азота). Один из ключевых принципов (глава III, принцип 6) состоит в том, что меры, направленные на сокращение одной формы потерь азота, должны сопровождаться либо сокращением ввода нового азота, либо увеличением объема собранного урожая для поддержания соответствия массы. Таким образом, то, что на первый взгляд может быть принято за отрицательную корреляцию в масштабе отдельно взятого поля, в ландшафтном и региональном масштабе можно рассматривать как возможность повышения степени циркулярности системы с более низкими общими потерями азота.

274. Характер азотного цикла и его взаимодействие с циклами углерода, фтора и других питательных веществ требуют применения комплексного подхода к решению проблемы выбросов азота и парниковых газов и исследования мер по смягчению их последствий на уровне понимания всего процесса. Моделирование на базе систем должно играть ключевую роль в интеграции всех аспектов сложного характера управленческих и экологических факторов, воздействующих на выбросы. В этом направлении был достигнут определенный прогресс (Sommer and others, 2009), при этом в ходе ряда исследований разработаны модели комплексного управления сельскохозяйственным предприятием, в том числе животноводческой фермой (del Prado and others, 2010).

### **Решение вопросов защиты окружающей среды**

275. Концепции, определяющие передовую практику в области снижения негативного воздействия на окружающую среду, зависят от следующих комплексных концепций:

- a) взаимосвязь между выбросами азота и парниковых газов;
- b) влияние изменения климата на выбросы азота;
- c) взаимосвязь между мерами по борьбе с загрязнением/смягчению его последствий и мерами по адаптации;
- d) взаимосвязь между выбросами азота и благополучием животных;
- e) комплексная оценка всего процесса управления навозом;

<sup>22</sup> Директива Совета от 12 декабря 1991 года об охране вод от загрязнения нитратами из сельскохозяйственных источников, *Official Journal of the European Communities*, L 375 (1991), pp. 1–8.

- f) комплексная оценка с учетом трех основных составляющих устойчивости: экономической, экологической и социальной;
- g) зависимость между потребительским спросом и выбросами азота;
- h) разработка адаптированных к региональным условиям концепций устойчивой интенсификации;
- i) разработка моделей производства животноводческой продукции в региональном, национальном и глобальном масштабах;
- j) экономическое воздействие стоимости технологий и выгод для сельхозпроизводителей от сокращения выбросов и удержания азота в качестве удобрения.

276. Для выработки концепции снижения негативного воздействия на окружающую среду требуют понимания на уровне технологии следующие элементы:

- a) оценка выбросов из помещений для содержания животных с естественной вентиляцией;
- b) оценка выбросов из новых, учитывающих потребности животных систем содержания;
- c) разработка мер по борьбе с загрязнением/смягчению его последствий, особенно в случае коровников для молочного скота с естественной вентиляцией (например, контролируемая вентиляция и скрубберы, подкисление навоза);
- d) взаимосвязь между изменением климата и тепловым стрессом/поведением животных/выбросами;
- e) взаимосвязь между низкопротеиновым рационом и выбросами азота и парниковых газов;
- f) взаимосвязь между выбросами азота и парниковых газов при содержании животных в помещении, хранении навоза и внесении его в почву;
- g) оценка на протяжении жизненного цикла: например, рациона молочных коров на основе травы в сравнении с низкопротеиновым рационом молочных коров;
- h) добавки к кормам и навозу для повышения эффективности использования азота;
- i) обработка навоза для повышения эффективности использования азота (повышение доступности питательных веществ, снижение выбросов) и потенциал переработки для рекуперации содержащегося в навозе азота в виде биоудобрений в соответствии с принципами экономики замкнутого цикла.

277. Концепции уменьшения негативного воздействия на окружающую среду зависят от разработки гибких концепций улучшения состояния окружающей среды:

- a) климатические условия и условия на каждом конкретном объекте в регионе ЕЭК ООН и во всем мире крайне различны;
- b) необходимо учитывать все три важнейших составляющих устойчивости: экономическую, экологическую и социальную;
- c) необходимо урегулировать конфликты интересов;
- d) адаптация подходов в соответствии с потребностями различных регионов.

278. Концепции уменьшения негативного воздействия на окружающую среду зависят от эффективности коммуникации и взаимодействия:

- a) создание сетей для обмена информацией о системах управления навозом, налаживания контактов между фермерами и создания партнерств;
- b) запуск онлайн-центра знаний о передовой практике в области содержания сельскохозяйственных животных в помещении и управления навозом;

с) создание реестра экспертов для оказания адресной технической помощи и подготовки кадров, анализа и практического осуществления, а также оказания поддержки в области политики, в значительной степени на базе совместного финансирования и ресурсов в натуральной форме, предоставляемых партнерами;

d) разработка концепций передовой практики является сложной задачей. Климатические особенности и условия для каждого хозяйства весьма неодинаковы. Необходимо учитывать три важнейших фактора устойчивости (экономика, окружающая среда и общество), а также вопросы синергизма и потенциального конфликта интересов. Отсюда неизбежно следует вывод о том, что универсального решения не существует. Концепции передовой практики формируют базу, на основе которой разрабатываются гибкие меры, учитывающие особенности каждого конкретного региона и контекст.

## Н. Справочная литература

- Aarnink, A. J. A., van den Berg, A.J., Keen, A., Hoeksma, P., Verstegen, M.W.A. 1996. Effect of slatted floor area on ammonia emission and on the excretory and lying behaviour of growing pigs. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 64, 299–310.
- Amon, T., Boxberger, J. (2000). Biogas production from farmyard manure. In: FAO European Cooperative Research (Ed.), *Management Strategies for Organic Wastes in Agriculture*. Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN), 9<sup>th</sup> International Conference, 6 – 9<sup>th</sup> September 2000, Gargnano, Italy.
- Amon, T., Boxberger, J., Gronauer, A., Naser, S. 1995. Einflüsse auf das Entmischungsverhalten, Abbauvorgänge und Stickstoffverluste von Flüssigmist während der Lagerung. In: *Bau und Technik in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, Beiträge zur 2. Internationalen Tagung am 14./15. März 1995 in Potsdam*. Institut für Agrartechnik Bornim, MEG, KTBL, AEL (Eds), pp. 91–98.
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Frohlich, M., Amon, T., Pollinger, A., Mosenbacher, I., Hausleitner, A. 2007. Ammonia and greenhouse gas emissions from a straw flow system for fattening pigs: Housing and manure storage. *Livestock Science* 112, 199–207.
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T., Zechmeister-Boltenstern, S. 2006. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112, 153–162.
- Bernal, M.P., Bescós, B., Bonmatí, A., Burgos, L., Bustamante, M. Á., Clemente, R. Fabbri, C., Flotats, X., García-González, M.C., and 17 others. 2015. *Evaluation of manure management systems in Europe*. LIFE + MANEV report. LIFE09 ENV/ES/000453, Published by SARGA. <https://core.ac.uk/download/pdf/46606176.pdf>.
- Bittman, S., Dedina, M., Howard C.M., Oenema, O., Sutton, M.A., (Eds.). 2014. *Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen*. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh, UK.
- Braam, C. R., Ketelaars, J., Smits, M.J.C. 1997a. Effects of floor design and floor cleaning on ammonia emission from cubicle houses for dairy cows. *Netherlands Journal of Life Sciences* 45, 49–64.
- Braam, C. R., Ketelaars, J., Smits, M.J.C. 1997b. Ammonia Emission from a Double-Sloped Solid Floor in a Cubicle House for Dairy Cows. *Journal of Agricultural Engineering Research* 68, 375–386.
- Broderick, G. A. 2003. Effects of Varying Dietary Protein and Energy Levels on the Production of Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 86, 1370–1381.
- Burton, C.H. 1998. Processing strategies for organic wastes. In: J. Martinex (Ed.) *Management strategies for organic waste use in agriculture*. Abstracts of papers of 8th international conference of the FAO network on recycling of agricultural, municipal and industrial residues in Agriculture.
- Burton, C. H. 2007. The potential contribution of separation technologies to the management of livestock manure. *Livestock Science* 112, 208–216.
- Butterbach-Bahl, K., Per Gundersen, P., Ambus, P., Augustin, J., Beier, C., Boeckx, P., Dannenmann, M., Sanchez Gimeno, B., Ibrom, A., Kiese, R., Kitzler, B., Rees, R.M., Smith, K.A., Stevens, C., Vesala, T., Zechmeister-Boltenstern, S. 2011a. Nitrogen processes in terrestrial ecosystems. Chapter 6 in: M.A. Sutton, C.M. Howard, J.W. Erisman, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, H. van Grinsven, B. Grizzetti, (Eds.), *The European Nitrogen Assessment* (pp. 99–125). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Butterbach-Bahl, K., Nemitz, E., Zaehle, S., Billen, B., Boeckx, P., Erisman, J.W., Garnier, J., Upstill-Goddard, R., Kreuzer, M., Oenema, O., Reis, S., Schaap, M., Simpson, D., de Vries, W., Winiwarter, W., Sutton, M.A. 2011b. Effect of reactive nitrogen on the

- European greenhouse balance. Chapter 19 in: *The European Nitrogen Assessment* (pp 434–462). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Canh, T. T., Aarnik, A., Schutte, J.B., Sutton, D.J., Verstegen, M.W.A. 1998. Dietary protein affects nitrogen excretion and ammonia emission from slurry of growing-finishing pigs. *Livestock Production Science* 56 (no. 5, December), 181–191.
- Chadwick, D., Sommer, S., Thorman, R., Fanguero, D., Cardenas, L. Amon, B., Misselbrook, T. 2011. Manure management: Implications for greenhouse gas emissions. *Animal Feed Science and Technology* 166–167, 514–531.
- Chowdhury, A., de Neergaard, A., Jensen, L.S. 2014. Composting of solids separated from anaerobically digested animal manure: Effect of different bulking agents and mixing ratios on emissions of greenhouse gases and ammonia. *Biosystems Engineering* 124, 63–77 <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.003>.
- De La Mora-Orozco, C., González-Acuña, I.J., Saucedo-Terán, R.A., Flores-López, H.E., Rubio-Arias, H.O., Ochoa-Rivero, J.M. 2018. Removing Organic Matter and Nutrients from Pig Farm Wastewater with a Constructed Wetland System. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (5), 1031.
- Dämmgen, U., Hutchings, N.J. 2008. Emissions of gaseous nitrogen species from manure management: a new approach. *Environmental Pollution*, 154, 488–497.
- del Prado, A., Chadwick, D., Cardenas, L., Misselbrook, T., Scholefield, D., Merino, P. 2010. Exploring systems responses to mitigation of GHG in UK dairy farms. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 136, 318–332.
- Denmead, O.T., Freney, L.R., Simpson J.R. 1982. Dynamics of ammonia volatilization during furrow irrigation of maize. *Soil Science Society of America Journal* 46, 149–155.
- DLG 2020. *DLG-Testzentrum Technik und Betriebsmittel: Prüfraumen Abluftreinigungssysteme für Tierhaltungsanlagen, Groß-Umstadt*. <https://www.dlg.org/de/landwirtschaft/tests/suche-nach-pruefberichten/#!/p/3/u/95/1?locale=de&locale=en>.
- Dosch, P. 1996. *Optimierung der Verwertung von Güllestickstoff durch Separiertechnik und kulturartsspezifische Applikationstechniken*. Bayerisches Staatsministerium für ELuF, Gelbe Reihe, Landtechnische Berichte aus Praxis und Forschung, No 56.
- Ellen, H. H., Hol, J.M.G., Hoofs, A.I.J., Mosquera, J., Bosma, A.J.J. 2008. *Ammoniakemissie en kosten van chemische luchtwater met bypassventilatoren bij vleesvarkens* (Ammonia emission and costs of a chemical air-scrubber with bypass ventilation at a pig house). Animal Sciences Group Report 151. Wageningen, the Netherlands: Wageningen University and Research Centre. Available from <http://edepot.wur.nl/35138>.
- Elliott, H. A. and Collins, N. E. 1982. Factors Affecting Ammonia Release in Broiler Houses. *Transactions ASAE*, 25(2), 413–418, doi:10.13031/2013.33545.
- Fanguero, D., Coutinho, J., Chadwick, D., Moreira, N., Trindade, H. 2008a. Effect of cattle slurry separation on greenhouse gas and ammonia emissions during storage. *Journal of Environmental Quality*, 37 (no. 6, November), 2322–2331.
- Fanguero, D., Pereira, J., Chadwick, D.R., Coutinho, J., Moreira, N., Trindade, H. 2008b. Laboratory assessment of the effect of cattle slurry pre-treatment on organic N degradation after soil application and N<sub>2</sub>O and N<sub>2</sub> emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 80, 107–120.
- Fanguero D., Hjorth M., Gioelli F. 2015. Acidification of animal slurry: a review. *Journal of Environmental Management* 149, 46–56.
- Firestone, M.K., and Davidson, E.A. 1989. Microbial basis of NO and N<sub>2</sub>O production and consumption in soil. In: M.O. Andreae and D.S. Schimel (Eds.), *Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere* (pp. 7–21). Wiley, New York, NY, USA.

- Gilhespy, S. L., Webb, J., Chadwick, D.R., Misselbrook, T., Kay, R., Camp, V., Retter, A.L., Bason, A. 2009. Will additional straw bedding in buildings housing cattle and pigs reduce ammonia emissions? *Biosystems Engineering* 102, 180–189.
- Graves, D.B., Bakken, L.B., Jensen, M.B., Ingels, R. (2019) Plasma activated organic fertilizer. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 39, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11090-018-9944-9>.
- Guingand N. 2009. *Wet scrubber: one way to reduce ammonia and odours emitted by pig units*. Paper presented at the sixtieth meeting of the European Association for Animal Production, Barcelona, Spain, 24–27 August 2009.
- Guingand, N. and Courboulay, V. 2007. Reduction of the number of slots for concrete slatted floor in fattening buildings: consequences for pigs and environment. In G. J. Monteny and E. Hartung (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Ammonia in Agriculture: Policy, Science, Control and Implementation, 19–21 March 2007, Ede, Netherlands* (pp. 147–148). Wageningen, the Netherlands: Wageningen Academic Publishers.
- Hahne, J., Arends, F., Beverborg, R., Niehoff, A.-L., Bönsch, S., Hortmann-Scholton, A. 2016. *Aktuelle Entwicklung Kosten-Nutzenanalyse und Vollzugsempfehlungen für den Einsatz von Abluftreinigungsanlagen in der Tierhaltung*. UBA Texte 61/2016, pp. 41–65.
- Huynh, T. T. T., Aarnink, A.J.A., Spolder, H.A.M., Verstegen, M.W.A., Kemp, B. 2004. Effects of floor cooling during high ambient temperatures on the lying behavior and productivity of growing finishing pigs. *Transactions of the ASAE*, 47 (5), 1773–1782.
- Hutchinson, G. L. and Davidson E.A. (1993): *Processes for production and consumption of gaseous nitrogen oxides in soil*. ASA special publication Nr. 55, 79–93.
- Jensen, L.S. (2013) Animal Manure Residue Upgrading and Nutrient Recovery in Biofertilizers. Chapter 14 in S.G. Sommer, M.L. Christensen, T. Schmidt, L.S. Jensen (Eds.) *Animal Manure Recycling - Treatment and Management* (pp. 271-294). John Wiley and Sons Ltd., ISBN 9781118488539.
- Kai, P., Pedersen, P., Jensen, J.E., Hansen, M.N., Sommer, S.G. 2008. A whole-farm assessment of the efficacy of slurry acidification in reducing ammonia emissions. *European Journal of Agronomy* 28, 148–154.
- Kocatürk-Schumacher, N.P., Bruun, S., Zwart, K., Jensen, L.S. 2017. Nutrient recovery from the liquid fraction of biogas digestate by adsorption to clinoptilolite. *CLEAN — Soil, Air, Water* 45 (6), 1500153 <http://dx.doi.org/10.1002/clean.201500153>.
- Kocatürk, N.P., Zwart, K., Bruun, S., Jensen, L.S. Brussaard, L. 2019. Recovery of nutrients from the liquid fraction of digestate: Use of eNriched zeolite and biochar as nitrogen fertilizers. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 182, 187–195. [doi.org/10.1002/jpln.201800271](https://doi.org/10.1002/jpln.201800271).
- Kupper, T., Häni, C., Neftel, A., Kincaid, C., Bühler, M., Amon, B., VanderZaag, A. 2020 (under revision). Ammonia and greenhouse gas emissions from slurry storage — a review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Lassaletta, L., Estellés, F., Beusen, A.H.W., Bouwman, L., Calvet, S., van Grinsven, H.J.M., Doelman, J.C., Stehfest, E., Uwizeye, A., Westhoek, H. 2019. Future global pig production systems according to the Shared Socioeconomic Pathways. *Science of The Total Environment* 665, 739–751.
- Lukin, S.M., Nikolskiy, K.S., Ryabkov, V.V., Rysakova, I.V. 2014 Methods to reduce ammonia nitrogen losses during production and application of organic fertilizers. In: *Ammonia workshop 2012 Saint Petersburg. Abating ammonia emissions in the UNECE and EECCA region* (pp. 169–175).
- Melse, R. W., Ogink, N.W.M., Bosma B.J.J. 2008. Multi-pollutant scrubbers for removal of ammonia, odor, and particulate matter from animal house exhaust air. In: *Proceedings of the Mitigating Air Emissions from Animal Feeding Operations Conference*, 19–21 May 2008, Des Moines, Iowa, United States of America.

- Melse, R. W., Hofschreuder, P., Ogink, N.W.M. 2012. Removal of Particulate Matter (PM<sub>10</sub>) by Air Scrubbers at Livestock Facilities: Results of an On-Farm Monitoring Program. *Transactions of the ASABE* 55, 689–698.
- Melse, R. W., and Ogink N.W.M. 2005. Air scrubbing techniques for ammonia and odor reduction at livestock operations: Review of on-farm research in the Netherlands. *Transactions of the ASAE* 48, 2303–2313.
- Misselbrook, T. H. and Powell J.M. 2005. Influence of Bedding Material on Ammonia Emissions from Cattle Excreta. *Journal of Dairy Science*, 88, 4304–4312.
- Møller, H. B., Hansen J. D., Sørensen C.A.G. 2007. Nutrient recovery by solid–liquid separation and methane productivity of solids. *Transactions of the ASABE* 50, 193–200.
- Monteny, G. J. 2000. *Modelling of ammonia emissions from dairy cow houses*. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands (with summaries in English and Dutch).
- Nielsen, D.A., Nielsen, L.P., Schramm, A., Revsbech, N.P. 2010. Oxygen distribution and potential ammonia oxidation in floating, liquid manure crusts. *Journal of Environmental Quality* 39, 1813–1820.
- Ogink, N.W.M., and Bosma, B.J.J. 2007. Multi-phase air-scrubbers for the combined abatement of ammonia, odor and particulate matter emissions. In: *Proceedings of the International Symposium on Air Quality and Waste Management for Agriculture*, Broomfield, Colorado, 16–19 September 2007. ASABE. Available from <http://elibrary.asabe.org/conference.asp?confid=aqwm2007>.
- Olesen, J.E., and Sommer, S.G. 1993. Modelling effects of wind speed and surface cover on ammonia volatilization from stored pig slurry. *Atmospheric Environment. (Part A General Topics)* 27A, 2567–2574.
- Owusu-Twuma, M.Y., Polastre, A., Subedi, R., Santos, A.S., Ferreira, L.M.M., Coutinho, J., Trindade, H. 2017. Gaseous emissions and modification of slurry composition during storage and after field application: Effect of slurry additives and mechanical separation. *Journal of Environmental Management* 200, 416–422.
- Pantelopoulos, A., Magid, J., Jensen, L.S., Figueiro, D. 2017. Nutrient uptake efficiency in ryegrass fertilized with dried digestate solids as affected by acidification and drying temperature. *Plant and Soil* 421, 401–416.
- Patterson, P. H., and Adrizal. 2005. Management Strategies to Reduce Air Emissions: Emphasis — Dust and Ammonia. *Journal of Applied Poultry Research* 14 (no. 3, Fall), 638–650.
- Petersen, S.O., and Ambus, P. 2006. Methane oxidation in pig and cattle slurry storages, and effects of surface crust moisture and methane availability. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74, 1–11.
- Petersen, S.O., Amon, B., Gattinger, A. 2005. Methane oxidation in slurry storage surface crusts. *Journal of Environmental Quality* 34, 455–461.
- Petersen S.O., Andersen A.J., Eriksen J. 2012. Effects of Cattle Slurry Acidification on Ammonia and Methane Evolution during Storage. *Journal of Environmental Quality* 41, 88–94. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0184>.
- Petersen, S.O., and Miller, D.N. 2006. Greenhouse gas mitigation by covers on livestock slurry tanks and lagoons? *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86, 1407–1411.
- Poach, M. E., Hunt, P. G., Vanotti, M. B., Stone, K. C., Matheny, T. A., Johnson, M. H. and Sadler, E. J. 2003. Improved nitrogen treatment by constructed wetlands receiving partially nitrified liquid swine manure. *Ecological Engineering* 20, 183–197. [doi.org/10.1016/S0925-8574\(03\)00024-7](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(03)00024-7).
- Powell, J. M., Misselbrook T.H., Casler M.D. 2008. Season and bedding impacts on ammonia emissions from tie-stall dairy barns. *Journal of Environmental Quality*, 37, 7–15.

- Reis, S., Howard, C., Sutton, M. A. (Eds.). 2015. *Costs of Ammonia Abatement and the Climate Co-Benefits*. Springer, 284 pp.
- Ritz, C. W., Mitchell, B.W., Fairchild, B.D., Czarick, M., Worley, J.W. 2006. Improving In-House Air Quality in Broiler Production Facilities Using an Electrostatic Space Charge System. *Journal of Applied Poultry Research* 15 (no. 2, Summer), 333–340.
- Santonja, G.G., Georgitzikis, K., Scalet, B.M., Montobbio, P., Roudier, S. Delgado Sancho, L. 2017. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Intensive Rearing of Poultry or Pigs*. EUR 28674 EN. doi:10.2760/020485.
- Smits, M. C. J. 1998. *Groeven maken in een dichte V-vormige vloer: enkele observaties naar loopgedrag en ammoniakemissies* (Grooving a solid V-shaped floor: some observations on walking behaviour and ammonia emission). DLO18-IMAG19 Report P, 98–60. Wageningen, the Netherlands.
- Sommer, S.G., Olesen, J.E., Petersen, S.O., Weisbjerg, M.R., Valli, L., Rohde, L., Béline, F. 2009. Region-specific assessment of greenhouse gas mitigation with different manure management strategies in four agroecological zones. *Glob. Change Biol.* 15, 2825–2837.
- Sommer, S.G., Christensen, M.L., Schmidt, T., Jensen, L.S. (Eds.). 2013. *Animal Manure Recycling - Treatment and Management*. John Wiley and Sons Ltd., ISBN 9781118488539, 384 pp.
- Sutton, M.A. and others (2013). *Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution*. Global Overview of Nutrient Management (Edinburgh, Centre of Ecology and Hydrology).
- Swensson, C. 2003. Relationship between content of crude protein in rations for dairy cows, N in urine and ammonia release. *Livestock Production Science* 84 (no. 2, December), 125–133.
- Swierstra, D., Braam, C.R., Smits, M.J.C. 2001. Grooved floor systems for cattle housing: ammonia emission reduction and good slip resistance. *Applied Engineering in Agriculture* 17, 85–90.
- VanderZaag, A.C., Gordon, R.J., Jamieson, R.C., Burton, D.L., Stratton, G.W. 2009. Gas emissions from straw covered liquid dairy manure during summer storage and autumn agitation. *Transactions of the ASABE* 52, 599–608.
- VDLUFA 2019. *Kongressband*. Gießen.
- Webb, J., Misselbrook, T.H. 2004. A mass-flow model of ammonia emissions from UK livestock production. *Atmospheric Environment* 38, 2163–2176.
- Whitehead, D. C. 2000. *Nutrient Elements in Grassland: Soil-Plant-Animal Relationships*. Wallingford, United Kingdom: CABI Publishing.
- Ye, Z.Y., Zhang, G.Q., Li, B.M., Strøm, J.S., Tong, G.H., Dahl, P.J. 2008a. Influence of airflow and liquid properties on the mass transfer coefficient of ammonia in aqueous solutions. *Biosystems Engineering* 100 (3), 422–434.
- Ye, Z.Y., Zhang, G.Q., Li, B.M., Strøm, J.S., Dahl, P.J. 2008b. Ammonia emissions affected by airflow in a model pig house: effects of ventilation rate, floor slat opening and headspace height in a manure storage pit. *Transactions of the ASABE*, 51, 2113–2122.
- Zhao, Y., Aarnink, A.J.A., Jong, M.C.M.de., Ogink, N.W.M., Groot, Koerkamp, P.W.G. (2011). Effectiveness of multi-stage scrubbers in reducing emissions of air pollutants from pig houses. *Transactions of the ASABE* 54, 285–293.
- zu Ermgassen, E.K.H.J., Phalan, B., Green, R.E., Balmford, A., 2016. Reducing the land use of EU pork production: where there's swill, there's a way. *Food Policy* 58, 35–48.

## V. Применение органических и неорганических удобрений

### A. Введение и справочная информация

279. Азот (N) является питательным веществом, извлекаемым сельскохозяйственными культурами из почвы в наибольших количествах, и его доступность для растений в наибольшей степени влияет на урожайность и питательные качества, а следовательно — на способность сельскохозяйственных предприятий производить продовольствие для человека. Управление различными видами поступления азота в сельскохозяйственные почвы влияет на последующий азотный цикл, использование азота растениями и потери азота в различных формах в окружающей среде. До настоящего времени основное внимание уделялось контролю отдельных форм потерь азота, таких как азотное выщелачивание (Директива Европейского союза по нитратам), аммиак (Гётеборгский протокол, Директива Европейского союза о национальных потолочных значениях выбросов<sup>23</sup> и Директива о сохранении естественной среды обитания) и закись азота (Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата), и выносились соответствующие рекомендации (например, UNECE Ammonia Guidance Document, Bittman and others, 2014). При попытке разработать более единообразный подход к руководящим указаниям в отношении азота крайне важно хорошо понимать то, как практика управления и целенаправленные меры по сокращению выбросов/смягчению последствий влияют на весь азотный цикл, а не только на отдельные механизмы потерь. Необходимо понимание того, как деятельность человека, включая сельское хозяйство, способна влиять на все циклы питательных веществ, и особенно на круговорот азота, который в значительной степени зависит от микробиологической активности и, следовательно, особенно чувствителен к почвенному углероду, влаге и температуре. В настоящей главе обсуждаются комплексные подходы к сокращению потерь азота через воздух и воду при поступлении азота в почву сельскохозяйственных угодий, выделяются основные механизмы поступления и потерь, а также описываются наиболее важные меры и определяются первоочередные рекомендации для директивных органов и специалистов-практиков с целью сокращения выбросов/смягчения последствий.

280. Настоящую главу следует рассматривать совместно с главой IV, касающейся использования навоза домашнего скота. Необходимо применять комплексный подход к снижению потерь азота во всех звеньях цепочки управления навозом, чтобы на этапе внесения удобрений в почву обеспечить сохранение преимуществ (например, снижение потерь), достигнутых при применении мер на этапах содержания скота и хранения навоза. Цель заключается в обеспечении того, чтобы экономия азота, полученная на предыдущих этапах, не была впоследствии обнулена в результате неэффективного управления, связанного с внесением навоза в почву. Эта связь крайне важна для  $\text{NH}_3$ , так как на протяжении всего цикла операций по управлению навозом необходимо свести к минимуму контакт навоза с воздухом (принцип 15).

281. Термин «неорганические удобрения» используется в тексте настоящей главы для обозначения искусственных неорганических и биоминеральных удобрений, которые часто называют синтетическими удобрениями. К ним относятся все виды минеральных азотных удобрений, такие как аммиачная селитра и сульфат аммония, а также карбамид (и удобрения на основе карбамида). Хотя с химической точки зрения карбамид является органической молекулой, его обычно относят к категории «неорганических» удобрений, поскольку обычно он производится из неорганических материалов ( $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$ ), и группируют с другими неорганическими удобрениями, такими как нитрат аммония, фосфат и сульфат. С развитием циклической экономики, предусматривающей возврат азота из органических источников для производства

<sup>23</sup> Директива 2016/2284/ЕС Европейского парламента и Совета Европейского союза от 14 декабря 2016 года о сокращении национальных выбросов в атмосферный воздух определенных загрязняющих веществ, об изменении Директивы 2003/35/ЕС и об отмене Директивы 2001/81/ЕС, *Official Journal of the European Union*, L 344, 2016, pp. 1–31.

неорганических удобрений (например, меры по рекуперации питательных веществ 3–5), такие различия становятся все более размытыми.

## **В. Поступление азота в почву сельскохозяйственных угодий**

282. Азот вносится непосредственно в почву сельскохозяйственных угодий в качестве питательного вещества для сельскохозяйственных культур в форме искусственных неорганических удобрений, органических удобрений, например навоза домашнего скота (включая мочу), или в форме других органических добавок, получаемых из отходов или побочных продуктов (например, необработанного осадка, бытовых и пищевых отходов, побочных продуктов процессов пищевой переработки, продуктов переработки непищевого животного сырья, продуктов анаэробного сбраживания, компоста). Для целей настоящей главы все эти источники рассматриваются как органические или неорганические удобрения.

283. При комплексном подходе к управлению навозом домашнего скота следует учитывать усовершенствованные методы хранения, использования и/или переработки навоза (глава IV), что может привести к увеличению объема азота и/или повышению его доступности при внесении навоза в почву. Поступление азота на выпасные земли происходит в менее управляемой форме, обычно в ходе неравномерного распределения навоза и мочи пасущимся домашним скотом. На управляемых землях поступление азота также происходит за счет биологической фиксации бобовыми и несимбиотическими микробами, мокрого и сухого атмосферного осаждения азотных соединений и, опосредованно, за счет рециркулирования пожнивных остатков; эти поступления рассматриваются в масштабе ландшафта в главе VI.

284. Согласно оценкам, общий объем этих прямых и косвенных поступлений составляет в Европейском Союзе приблизительно 27 млн тонн азота в год (см. диаграмму V.1 ниже). Следует отметить, не все эти поступления азота в почву являются новыми; например, поступление от животных на выпасе, пожнивные остатки и часть внесенного в почву навоза представляют собой рециркуляцию азота, ранее удаленного из почвы в качестве фуража или корма для животных и впоследствии возвращенного в иной, зачастую более химически активной форме. Характеристики этих различных источников азота и управление ими играют важную роль в определении и повышении агрономической ценности для сельскохозяйственных и кормовых культур, а также в снижении потенциально вредного воздействия на окружающую среду и климат. Во всем регионе ЕЭК ООН существующие нормативные рамки ограничивают поступление азота в сельскохозяйственные почвы в некоторых уязвимых регионах (таких как регионы, на которые распространяется действие Директивы Европейского союза по нитратам). Дополнительные источники руководящих указаний относительно практических способов снижения воздействия сельскохозяйственных методов на азотное и азотистое выщелачивание через воду перечислены в разделе 4.1 настоящей главы.

285. Во многих странах региона ЕЭК ООН основная доля азота, вносимого в сельскохозяйственные почвы, приходится на неорганические удобрения, как это видно из диаграммы V.1, на которой представлена информация по Европейскому союзу. В отсутствие других азотных поступлений азотные удобрения, как правило, позволяют удвоить урожайность, в связи с чем азотные удобрения крайне важны для рентабельности и урожайности сельскохозяйственных культур во всех частях региона ЕЭК ООН. Искусственные азотные удобрения используются почти во всех хозяйствах региона ЕЭК ООН, за исключением тех, которые занимаются производством «биологически чистой» продукции (хотя даже в них могут использоваться некоторые формы искусственных удобрений, в том числе фосфорит). В Европе используется целый ряд различных составов и смесей азотсодержащих промышленных удобрений, но в целом можно говорить о том, что доставка азота осуществляется в химической форме аммония, нитрата или мочевины. Аммоний и нитрат непосредственно доступны для поглощения растениями (с учетом различных рекомендаций и пороговых ограничений по отдельным видам растений), хотя аммоний также будет преобразовываться в нитрат в почве в ходе микробного окислительного процесса

нитрификации, благодаря которому в почвенный раствор поступают подкисляющие ионы  $H^+$ . Аммоний и нитрат ведут себя в почве по-разному: выбросы аммония происходят из-за испарения аммиака, тогда как выбросы нитрата — из-за денитрификации (в форме газов  $N_2O$ ,  $NO_x$  и  $N_2$ ) и выщелачивания ( $NO_3^-$ ). В результате контакта с влажными почвами мочевины подвергается гидролизу в присутствии вездесущего фермента уреазы с образованием аммония (а затем нитрата); процесс гидролиза связан с повышением pH вблизи гранул, что значительно увеличивает уровень потерь в результате улетучивания аммиака.

286. К неорганическим удобрениям, содержащим только азот (называемым «обычными азотными продуктами»), относятся зерненный аммониевый нитрат (АН), нитрат кальция-аммония (НКА), мочевины и жидкий мочевино-аммониевый нитрат (МАН). Безводный аммиак — жидкое (газ под давлением) удобрение, требующее использования специального оборудования и соблюдения мер безопасности, а также подходящих почвенных условий для инъекторного внесения (например, проходимость почвы, которые являются не слишком твердыми или каменистыми для прохождения инъекторных лап). Сочетания азота с другими питательными веществами включают сульфат аммония, диаммонийфосфат и нитрат калия. В Европе в качестве удобрений в основном используют нитрат аммония и НКА, тогда как в целом в регионе ЕЭК ООН, включая Северную Америку и Центральную Азию, преобладает использование мочевины. В Европе на мочевины (простая мочевины, либо МАН) приходится лишь около 25 % общего потребления азота в удобрениях (по статистике Международной ассоциации производителей удобрений<sup>24</sup>), однако в некоторых европейских странах этот показатель, возможно, растет, что создает риск увеличения выбросов аммиака. По оценкам Европейской ассоциации производителей удобрений и Евростата<sup>25</sup>, импорт мочевины в Евросоюз вырос примерно вдвое: с 2,4 млн тонн в 2000/01 году до 4,8,–5,3 млн тонн в 2015–2017 годах.

Диаграмма V.1

Расчетные поступления азота в сельскохозяйственные почвы в 28 странах — членах Европейского союза (Гг N в год), 2014 год



Источник: значения получены на основе данных кадастра парниковых газов (ПГ) за 2016 год, представленного Европейским союзом для Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИКООН) (см.: [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/пункты/9492.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/пункты/9492.php)), за исключением величин биологической фиксации азота и атмосферного осаждения, которые были получены на основе данных Leip and others (2011) за 2002 год.

<sup>24</sup> См. <http://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>.

<sup>25</sup> См. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/newxtweb/>.

*Примечание:* ввод азота за счет пожнивных остатков, поступления от выпаса животных и, в определенной степени, операций по управлению животным навозом представляют собой рециркулирование азота в сельскохозяйственной системе.

287. Основными видами сельскохозяйственных животных, навоз которых после обработки используется в качестве удобрения для внесения в почву, являются крупный рогатый скот (молочный и мясной), свиньи и домашняя птица. Крупный рогатый скот и свиньи экскретируют азот в виде мочевины и сложных органических соединений, но в процессе содержания животных и хранения навоза мочевина быстро распадается на аммиак, поэтому вносимый в почву навоз содержит азот в органических и неорганических формах (аммоний и нитрат, а в случае птицы — мочевую кислоту и мочевину). Характеристики навоза зависят от рациона питания и состояния животных, условий содержания (включая использование подстилки) и систем хранения навоза, а также от любой последующей переработки перед внесением навоза в почву (см. главу IV). Ниже представлена более подробная информация о характеристиках навоза:

a) в случае крупного рогатого скота и свиней тип навоза может быть классифицирован как навозная жижа, состоящая из смеси мочи, экскрементов и воды с относительно небольшим количеством подстилочного материала (соломы или опилок) и содержанием сухого вещества, как правило, в пределах 1–10 %, или как более твердый стойловый навоз (СН), состоящий из мочи и экскрементов, смешанных с большим количеством подстилочного материала (как правило, соломы), с более высоким содержанием сухого вещества (>15 %);

b) навозная жижа обычно содержит 40–80 % азота в аммониевой форме, остальной азот — в органической форме, а также крайне незначительное количество азота в форме нитрата, что связано с анаэробными условиями;

c) стойловый навоз обычно содержит гораздо меньше азота в аммониевой форме из-за испарения и нитрификации аммиака и может содержать небольшое количество азота в нитратной форме. Органический азот в ХН со временем минерализуется в аммоний, становясь доступным для поглощения растениями, но также подвержен потере через воду и воздух;

d) с учетом методов кормления и систем управления свиньей навоз, как правило, содержит больше азота в целом и больше доступного (неорганического) азота, чем навоз крупного рогатого скота;

e) отходы птицеводческих хозяйств в целом классифицируются как помет, получаемый в системах, где экскременты смешиваются с подстилочным материалом (например, в бройлерниках или индюшатниках), или как навоз, когда обычно высушенные на воздухе экскременты собирают без подстилки (например, куры-несушки). Оба вида навоза имеют относительно высокое содержание сухого вещества (>30 %) и более высокое общее содержание азота, чем в навозе крупного рогатого скота или свиней. От 30 % до 50 % азота в птичьем помете может находиться в неустойчивом состоянии в виде мочевой кислоты или аммония;

f) разные виды навоза домашних животных различаются также по содержанию других основных и неосновных питательных веществ, при этом нормы внесения могут быть ограничены концентрацией фосфора (P), а не азота из-за относительно высокого соотношения P:N по сравнению с поглощением растениями;

g) на минерализацию/иммобилизацию, доступность и использование азота в навозе сильно влияет соотношение C:N навоза и почвы, рН почвы, влажность и температура почвы, а также методы внесения удобрений, например подповерхностная заделка.

288. В зависимости от региональных почвенно-климатических характеристик и систем управления крупный рогатый скот и овцы могут проводить значительную часть года на пастбищном содержании, а некоторые свиньи и домашняя птица при определенных производственных системах (например, «свободный выгул») также могут содержаться на открытом воздухе. Особенности поведения свиней таковы, что

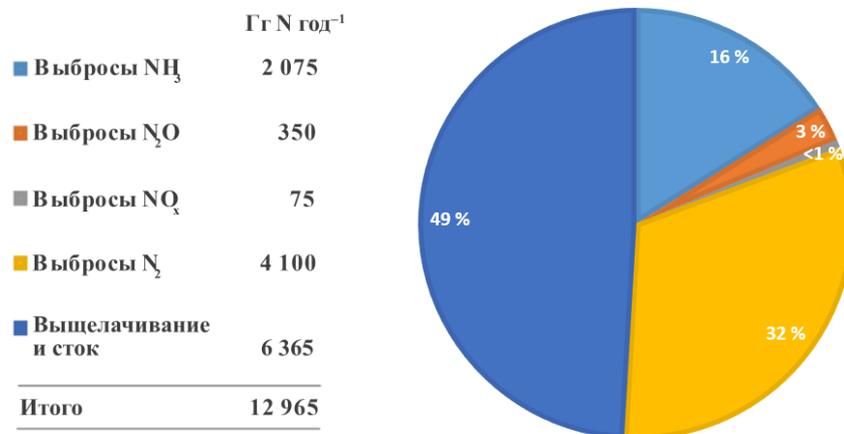
они выбирают специальные зоны для испражнения и мочеиспускания, тогда как крупный рогатый скот и овцы испражняются случайным образом на всей территории пастбища, причем более значительный объем испражнений фиксируется в местах стойбища (где животные предпочитают лежать) или в местах с интенсивной проходимостью. Во время выпаса содержащийся в корме азот, не удерживаемый животным, экскретируется непосредственно на землю пастбища высококонцентрированными порциями в виде навоза и мочи. Навоз содержит в основном органические формы азота, который впоследствии минерализуется со скоростью, зависящей от почвенных и экологических факторов, тогда как азот в моче фактически находится в неорганической форме<sup>26</sup> и сразу же может быть потерян за счет испарения, выщелачивания и денитрификации аммиака (Selbie and others, 2015). В сухих условиях в местах концентрации мочи и экскрементов на небольших по площади участках может происходить отмирание травы, что снижает поглощение азота, или же ее ускоренный рост. Кроме того, крупный рогатый скот может некоторое время не потреблять траву на участках концентрации навоза, что, возможно, объясняется стремлением избежать кишечных гельминтов. Интенсивный выпас скота, как правило, способствует более равномерному распределению навоза и мочи и производству и потреблению травы (и ведет к более высоким потерям азота).

289. На сельскохозяйственных землях применяется ряд других N-содержащих органических удобрений. Хотя общий объем их применения в настоящее время невелик, он, скорее всего, будет расти (и стимулироваться) по мере перехода к концепции экономики замкнутого цикла. Использование таких органических удобрений может увеличить (например, анаэробное сбраживание) или уменьшить (например, компостирование) доступность азота для растений. Такими материалами могут быть жидкости (например, дигестат) или твердые вещества (например, компост), получаемые из отходов жизнедеятельности человека, пищевого производства, зеленых отходов и т. д., и для целей настоящей главы, посвященной неорганическим и органическим удобрениям, они косвенно включаются в обсуждение вопросов, касающихся рационального использования навоза. Несмотря на то что такое повторное использование важно для устойчивого развития общества, количество дополнительного азота, поступающего в сельскохозяйственные системы с другими органическими добавками, скорее всего, будет меньше, чем поступление от навоза и удобрений из-за масштабов доступных массовых потоков и расстояния от мест выращивания культур. Некоторые средства (включая навоз) могут также неохотно приниматься сельхозпроизводителями и потребителями из-за опасений относительно загрязняющих веществ, таких как микропримеси металлов и пластика, патогены, антибиотики и гормоны и, возможно, наночастицы. Обработка этих продуктов для облегчения их транспортировки и повторного использования может быть сопряжена со значительными дополнительными расходами.

---

<sup>26</sup> Большая часть азота в моче содержится в виде мочевины. Хотя это небольшое органическое соединение, например,  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ , оно быстро гидролизуется, высвобождая аммиачный азот ( $\text{NH}_3$  и  $\text{NH}_4^+$ ) и углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ).

Диаграмма V.2  
Расчетные потери азота из сельскохозяйственных почв в 28 странах — членах Европейского союза (Гг N в год), 2014 год



Источник: значения получены на основе данных кадастра парниковых газов (ПГ) за 2016 год, представленного Европейским союзом РКИКООН (см.: [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/9492.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php)), за исключением показателей выбросов NO<sub>x</sub> и N<sub>2</sub>, которые были рассчитаны как доля от зарегистрированных выбросов N<sub>2</sub>O по данным Leip and others (2011).

### С. Потери азота из почвы

290. На диаграмме V.2 выше представлены расчетные потери азота из сельскохозяйственных почв в 28 странах — членах Европейского союза. Эти оценки сопряжены со значительной неопределенностью, однако указывают на то, что 50 % и более азота, поступающего в сельскохозяйственные почвы в этом регионе (включая атмосферные осадения), впоследствии теряются в виде выбросов в окружающую среду в результате газообразных испарений, выщелачивания и стока, а остальные 50 % поглощаются сельскохозяйственными культурами (потери на полях, связанные с импортируемыми культурами, не учитываются). Из потерь на полях почти половина приходится на выщелачивание и стоки, а еще треть — на диазот (N<sub>2</sub>) через денитрификацию. Хотя диазот является экологически безопасным, на него приходится значительная доля потерь полезного с агрономической точки зрения азота, поэтому снижение таких потерь позволяет снизить объем вносимого сельскохозяйственного азота с последующей экономией в других компонентах системы (включая производство азотных удобрений). Поскольку азотные потери из почв зависят от погодных условий, более экстремальные и непредсказуемые погодные явления, обусловленные изменением климата, усложняют управление земельными ресурсами с целью минимизации потерь азота, особенно через воду. В расширяющихся слоях глины, склонных к растрескиванию, особенно на необрабатываемых землях, засуха вызывает растрескивание почвы, что может приводить к обходному току воды (во время орошения или дождя) и азота.

291. Выбросы закиси азота (N<sub>2</sub>O) и NO<sub>x</sub><sup>27</sup>, согласно оценкам Leip and others, 2011 (см. диаграмму V.2 выше), составляют меньшую долю от общих потерь азота из сельскохозяйственных почв по сравнению с выбросами диазота и аммиака, а также выщелачиванием/стоком азота. Однако сельскохозяйственные почвы являются одними из наиболее значительных источников выбросов этих газов и, следовательно,

<sup>27</sup> См. сноску 2.

представляют собой ключевое направление для мероприятий по достижению национальных и международных целевых показателей сокращения выбросов.

292. Воздействие потерь азота из сельскохозяйственных почв на окружающую среду пространственно дифференцировано и обусловлено вариацией основных факторов, влияющих на потери (например, de Vries and Schulte-Uebbing, 2019). К таким факторам относятся плотность поголовья скота, интенсивность земледелия, характеристики почвы и климата, а также социально-экономические и управленческие системы, регулирующие поступление азота на уровне отдельного хозяйства и в региональном масштабе (включая пространственное распределение хозяйств). Значительная доля выбросов аммиака за счет азота, вносимого в сельскохозяйственные почвы, может перераспределиться на местном уровне и иметь потенциальное воздействие в результате эвтрофикации и подкисления, но при этом часть выбросов будет также участвовать в процессах переноса на большие расстояния и процессах, связанных с образованием аэрозолей и твердых частиц, что будет иметь дальнейшие последствия для здоровья человека и биоразнообразия. Аналогичным образом, потери азота в результате выщелачивания и за счет стока будут воздействовать на качество воды на местном уровне, на уровне водосборной площади, и, возможно, на региональном уровне в зависимости от механизма стока и процессов преобразования и восстановления азота в этих механизмах (Billen and others, 2013). Оксид азота (NO) и диоксид азота (NO<sub>2</sub>) (оксиды азота — NO<sub>x</sub>) являются загрязнителями окружающей среды, участвующими в фотохимических реакциях в тропосфере, и основными прекурсорами приземного озона в сельской местности. Поэтому в отношении этих реактивных азотных соединений требуется четкое понимание взаимосвязи «источник — рецептор», в том числе соответствующих пространственно-временных распределений. В отличие от этих соединений закись азота (N<sub>2</sub>O) оказывает не локальное, а глобальное воздействие в качестве парникового газа и вещества, разрушающего озоновый слой стратосферы (Bouwman and others, 2013).

#### **D. Руководящие принципы**

293. Азот в виде органических и неорганических удобрений вносится в сельскохозяйственные угодья для повышения урожайности и качества сельскохозяйственных культур. Большая часть поглощаемого растениями азота не теряется напрямую с выбросами в окружающую среду. Исключение составляют питательные вещества, высвобождаемые из растений в ходе циклов замерзания — оттаивания, во время старения и потери пожнивных остатков под воздействием воды и ветра. Поэтому основным принципом комплексного подхода к снижению потерь от применения азота в растениеводстве является повышение эффективности использования азота (например, доли азота, возвращенного в убранный урожай) и эффективности поглощения азота (например, доля азота, усвоенная растениями) в соотношении к общему объему вносимого азота. Повышение показателей эффективности использования азота позволяет сократить объем вносимого азота при поддержании урожайности и качества растений на приемлемом социально-экономическом уровне, что выгодно фермерам и обществу (с учетом того, что интенсификация производства обычно снижает эффективность использования азота). На этом принципе основана концепция прецизионного внесения химических удобрений и навоза, например, внесение азота в наиболее экономичных и рациональных объемах, в наиболее подходящее время, в надлежащей форме и точное введение в прикорневой слой почвы. Эти концепции обобщены в 4-х компонентном подходе к управлению питательными веществами (4R Nutrient Stewardship) (Bruulsema, 2018), который пропагандирует Международная ассоциация производителей удобрений, и которые также применимы к использованию органических удобрений, таких как моча, различные виды навоза и другие органические добавки. Фермеры, которые отказываются от органических удобрений, могут также рассмотреть возможность применения этих принципов к азотным ресурсам, получаемым за счет усиления биологической фиксации азота (например, с помощью эффективной обработки почвы, использования покровных культур и

методов севооборота). четырехкомпонентный подход к управлению питательными веществами включает в себя следующие понятия:

a) норма — количество вносимого азота должно точно соответствовать потребностям растения и усвояемому количеству, учитывая также те количества, которые были внесены в предыдущий период, и минерализацию пожнивных остатков;

b) время — вносимый азот должен быть легкодоступен именно в то время, когда культура нуждается в нем, с наименьшим риском для окружающей среды;

c) форма — вносимый азот должен соответствовать той форме (или быстро трансформироваться в ту форму), в которой данная культура может его легко усвоить во время вегетационного периода, при обеспечении минимального риска потерь через воду и воздух;

d) место — спустя короткое время после внесения удобрений азот должен быть легкодоступен для корневой системы растений, которая не должна повреждаться.

294. В рамках систем управления навозом сельскохозяйственных животных важно, чтобы методы хранения и переработки были направлены на минимизацию потерь (особенно в атмосферу, глава IV), чтобы сохранить как можно больше ресурсов азота для внесения в почву и усвояемости растениями. Норма внесения должна корректироваться в соответствии с расчетными или измеренными концентрациями азота в навозе после хранения, включая корректировки в целях учета экономии азота, полученной благодаря мерам по борьбе с загрязнением.

295. На эффективность использования и поглощения азота также оказывают влияние другие факторы, определяющие продуктивность сельскохозяйственных культур, включая методы земледелия, доступность других основных питательных веществ, погоду, воду, физические характеристики почвы, pH почвы (который может быть скорректирован путем известкования) и воздействие различных вредителей и болезней. Недостаточное внимание к любому из этих факторов может негативно сказаться на эффективности усвоения азота, урожайности и эффективности использования азота, что может привести к увеличению потерь азота в окружающую среду.

## **Е. Меры по борьбе с загрязнением**

296. В настоящем разделе представлены основные методы управления и меры по сокращению выбросов/смягчению последствий, которые оказывают влияние на показатели использования и потерь азота при его внесении в почву. Некоторые меры воздействуют на все формы потерь азота, а другие могут смягчить последствия потерь азота в одной из форм (например, испарение аммиака), оказывая незначительное или негативное воздействие на потери азота в других формах (например, денитрификация, выщелачивание/стоки), но все же могут быть полезны с точки зрения сокращения общих потерь азота. Эффективность некоторых мер может зависеть от конкретных обстоятельств и региона и обуславливаться такими факторами, как почва и климат. Эффективность борьбы с загрязнением можно повысить за счет комбинации определенных мер. Однако сокращение потерь в одной из форм при отсутствии мер, направленных на устранение излишка азота, неизбежно приведет к потерям в других формах (см. диаграмму III.1 выше). Поэтому важно соответствующим образом скорректировать нормы внесения.

297. После представленного ниже описания каждой меры, в таблице (см. таблицы V.1–V.20 ниже) каждой форме потерь азота присвоена категория ЕЭК ООН по эффективности/практической возможности осуществления (с использованием подхода, указанного в документе ECE/EB.AIR/120, Bittman and others, 2014), а также указана степень воздействия каждой меры<sup>28</sup>. Также представлены экспертные оценки по испарению аммиака, потерям в ходе денитрификации в виде закиси азота, NO<sub>x</sub>

<sup>28</sup> Описание категорий ЕЭК ООН и подхода к представлению степени воздействия см. п. 16 а)–с) главы I.

и диазота, потерям за счет стока и выщелачивания в виде нитрата, а также общим потерям азота. Если делается вывод о том, что мера приводит к увеличению потерь азота в той или иной форме, то она автоматически относится к категории 3 для данной формы азота. Степень воздействия может рассматриваться как показатель «эффективности» определенной меры, но не степени ее «применимости» в различных контекстах. Там, где необходимо уточнение, степень воздействия той или иной меры описывается в сравнении с заданной базовой системой. Например, в случае внесения в почву навозной жижи, базовая система представляет собой поверхностное внесение без каких-либо конкретных ограничений или добавок. В некоторых частях региона ЕЭК ООН некоторые базовые системы могут быть запрещены, например по причине уровней загрязнения, которыми сопровождается их использование.

**Меры, применимые как к неорганическим, так и к органическим удобрениям, включая различные виды навоза, мочу и другие органические материалы**

**Полевая мера 1: Комплексный план регулирования питательных веществ**

298. Этот подход нацелен на комплексный учет всех потребностей в питательных веществах выращиваемых в хозяйстве пахотных и кормовых культур за счет использования всех имеющихся органических и неорганических источников питательных веществ. Комплексные планы регулирования питательных веществ направлены на оптимизацию эффективности использования питательных веществ с помощью ряда мер, в том числе путем особого внимания к норме внесения азота, времени, форме и методу внесения (как обсуждалось ранее), а также путем соответствующей агрономической практики, включая: севооборот; использование покровных культур; приемы механической обработки почвы; ведение «истории» навоза; и управление почвой, водой и другими питательными веществами. Приоритет следует отдавать использованию сначала доступных источников органических питательных веществ (например, навоз), а оставшиеся потребности компенсировать за счет неорганических удобрений в соответствии с полевой мерой 3.

299. Для получения надежных оценок количества азота (и других питательных веществ), поступающего в результате внесения органического навоза, следует использовать рекомендательные системы. В идеале, они должны включать проведение химических анализов применяемых материалов (с помощью репрезентативного отбора проб и их отправки в соответствующие лаборатории или с использованием «экспресс-тестов» на местах) и опираться на информацию, полученную с помощью тестирования почвы на местах для определения текущей доступности питательных веществ. Если провести прямой анализ невозможно, то может понадобиться использование базовых «справочных» значений (например, UK RB209 <https://ahdb.org.uk/knowledge-library/rb209-section-2-organic-materials>). Определенная доля азота в органических добавках (различается в зависимости от типа добавки) имеет органическую, а не легкодоступную для растений минеральную форму. Поэтому часть вносимого азота станет доступна через некоторое время после внесения, в том числе в последующие сельскохозяйственные сезоны (Yan and others, 2020). Следовательно, необходимо учитывать потребности в азоте на протяжении всего периода севооборота.

300. На доступность питательных веществ влияет севооборот, так как после выращивания травостоя высвобождается относительно большое количество азота даже при незначительном его внесении в почву в прошлом. Кроме того, важно знать содержание P, так как в некоторых случаях это требует коррекции общих норм внесения навоза. Информация о содержащихся в навозе питательных веществах необходима для определения количества и сроков внесения дополнительных неорганических удобрений, необходимых растениям. Статистика по удобрениям свидетельствует о том, что правильный учет уровня содержания азота в органических добавках может уменьшить потребность во внесении удобрений и, соответственно, снизить загрязнение питательными веществами (например, Dalgaard and others, 2014). Количество вносимых удобрений может быть дополнительно сокращено в результате получения чистых выгод от использования мер по сокращению выбросов.

301. При разработке планов регулирования питательных веществ следует учитывать доступность, уровень содержания питательных веществ и углерода (C), а также соотношение углерода и азота в органических отходах, имеющих в пределах разумного расстояния перевозки.

302. Затраты, связанные с перевозкой (<10 км) и внесением органических добавок, могут быть компенсированы экономией на неорганических удобрениях и улучшением роста сельскохозяйственных культур благодаря внесению углерода и других питательных веществ (например, S, K, Zn и т. д.), а также улучшению показателя pH почвы. Однако эти питательные вещества могут не дать желаемого эффекта при внесении в почвы, которая в прошлом удобрялась навозом.

Таблица V.1

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 1**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>					
Степень воздействия	↓	↓	↓	↓↓	↓	↓↓

<sup>a</sup> При отсутствии комплексного плана регулирования питательных веществ в качестве базового показателя оценки эффективности используется показатель потери азота. Хотя эксперты согласны с тем, что такой план помогает снизить потери азота, необходима дальнейшая работа по проведению статистических сравнений эффективности хозяйств с точки зрения потерь азота.

**Полевая мера 2: Внесение питательных веществ в надлежащих количествах**

303. Недостаток азота вызывает снижение урожайности и содержания белка в культурах, органического вещества в почве (из-за тесной связи циклов азота и углерода в почве) и прибыли, а также к обеднению азотом почвы. Чрезмерные количества азота могут также привести к снижению урожайности (например, из-за полегания, несбалансированности удобрений, низкого процентного отношения массы урожая к полной массе растений) и прибыли, а также к переизбытку азота в почве, что увеличивает риск потерь через воздух и воду. Поэтому важно, чтобы норма внесения азота была экологически и экономически рациональной. Для этого необходимо знать как потребности культур на конкретном поле, так и количество азота, применяемого на нем. Нормы внесения не должны превышать установленные в законодательстве предельные значения, если таковые существуют.

304. Информацию о потребностях сельскохозяйственных культур, как правило, можно получить из региональных рекомендационных систем по удобрениям (например, UK RB209 <https://ahdb.org.uk/nutrient-management-guide-rb209>), используя кривые зависимости урожайности от азота, в которых учитывается тип культуры и способ ее выращивания, а также данные о типовой урожайности, почве, климате и предыдущих посевах. Сельхозпроизводителю необходимо скорректировать эти нормы в соответствии с ожидаемой урожайностью, которая заранее не известна (зависит от почвы, сорта сельскохозяйственной культуры и использовавшихся методов; например, дата посадки и ожидаемые погодные условия). Норма внесения зависит также от цен на сельскохозяйственные культуры и удобрения, однако при ее определении необходимо также учитывать опасность потерь за счет поступления азота в окружающую среду. Важно отметить, что использование целевого показателя экономически оптимальной нормы дает более последовательные результаты, чем использование целевого показателя оптимальной урожайности, поскольку экономическая кривая применения азота всегда имеет более плоскую форму, чем кривые роста сельскохозяйственных культур, а это означает, что фермерам следует провести тесты со сниженной нормой внесения, используя экспериментальные полосы и, там, где это возможно, методы оценки урожайности. Более совершенные системы

поддержки принятия решений, используемые для основных сельскохозяйственных культур в некоторых регионах, позволяют учитывать местные и сезонные условия и соответствующим образом корректировать прогнозируемую урожайность и потребности в азоте (например, система Adapt-N для кукурузы, которая используется на северо-востоке Соединенных Штатов Америки). Планируемая норма внесения может рассчитываться в масштабе всех угодий или, при наличии достаточных данных, в масштабе одного поля. Тестирование на полях под культурой с использованием визуальных индикаторов или почвенные тесты могут повысить точность расчета нормы внесения питательных веществ, но эти системы пока находятся в стадии разработки.

305. Определение надлежащей нормы внесения требует знания показателя содержания азота в органическом навозе или удобрении, который в случае неорганических удобрений обычно хорошо известен, а также количества вносимого продукта. Неточное дозирование удобрений может привести к тому, что на одних участках поля возникнет недостаток азота, а на других — переизбыток, поэтому важно использовать только прецизионные разбрасыватели удобрений и регулярно осуществлять их настройку (рекомендуется ежегодно), как по общей норме внесения, так и по равномерности распределения. Их также следует отрегулировать в соответствии с инструкцией по эксплуатации разбрасывателя, в зависимости от скорости, нормы внесения и типа удобрения (гранулометрия, твердость, сферичность и плотность). Системы разбрасывания, оснащенные глобальной системой позиционирования (GPS), позволяют добиться более равномерного распределения. Системы GPS в сочетании с датчиками, работающими в режиме реального времени, или картами предыдущих урожаев позволяют регулировать нормы внесения удобрений в зависимости от вариативности в пределах одного поля. Тестирование почвы или почвы на поле под культурой является наиболее подходящим методом в случае культур с относительно длительным вегетационным периодом, таких как кукуруза, но использование стартовых удобрений, что обычно является хорошей практикой, откладывает возможность проведения тестирования культур. Более позднее внесение азота позволяет повысить эффективность процесса принятия решений, но при этом ограничивает временные интервалы, в ходе которых возможно внесение, что может вызвать проблемы, например, во время засухи. Тестирование культур на поле целесообразно при дробном внесении удобрений или более позднем внесении удобрений, однако не совместимо с удобрениями замедленного или контролируемого действия, так как они вносятся во время или до посева.

306. Издержки, связанные с этой мерой, могут быть минимальными (ежегодная настройка разбрасывателя удобрений и/или навоза) или не слишком большими при покупке систем внесения удобрений с GPS или с переменной нормой внесения, но, как правило, они компенсируются повышением урожайности и/или качества, или экономией затрат, связанной с более низким уровнем использования удобрений. Более точно регулировать нормы внесения удобрений в будущем позволят моделирование с помощью искусственного интеллекта в режиме реального времени в сочетании с многосенсорным оборудованием, а также более надежное прогнозирование погодных условий и цен на сельскохозяйственную продукцию.

Таблица V.2

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 2**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>					
Степень воздействия	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓

<sup>a</sup> Определить исходный показатель для этой меры сложно; в странах ЕЭК ООН обычно вносят чрезмерные количества питательных веществ, что ведет к увеличению потерь  $N_f$  и  $N_2$ .

Неоднократное удаление питательных веществ с собранным урожаем без возвращения питательных веществ в почву также может привести к деградации почвы и риску эрозии, следовательно, в некоторых частях региона ЕЭК ООН может существовать проблема недостаточного снабжения питательными веществами.

### **Полевая мера 3: Внесение питательных веществ в надлежащее время**

307. Внесение в почву легкодоступного минерального азота в периоды, когда он не требуется активно растущим культурам, может привести к потере значительной части внесенного азота через воду или воздух. Если говорить о времени года, это, как правило, означает отказ от внесения азота в осенне-зимний период, когда в большей части региона ЕЭК ООН наиболее значительны потери от выщелачивания. В отдельных частях региона ЕЭК ООН в пределах Европейского союза этот аспект регулируется Национальными программами действий в соответствии с Директивой Европейского союза по нитратам. В других нормах национального законодательства в регионе ЕЭК ООН часто содержится указание на «запрещенные» периоды, когда внесение удобрений в почву не допускается (либо в масштабе всей страны, либо в пределах определенных регионов). Такие подходы помогают избежать наихудших сценариев, но не гарантируют применение оптимальной сельскохозяйственной практики. Следовательно, сроки внесения удобрений должны соответствовать потребностям сельскохозяйственных культур, которые обусловлены типом и физиологической стадией развития растений, а также почвенными и погодными факторами. Рекомендации по внесению удобрений содержат указания относительно количества и сроков внесения азота, которое обычно можно разделить на несколько временных интервалов внесения в течение вегетационного периода, чтобы добиться максимальной эффективности усвоения азота растениями и отдачи в плане урожайности и свести к минимуму потери через воздух и воду. Многократные внесения снижают риск эпизодов масштабного выщелачивания и позволяют отложить принятие некоторых решений о внесении удобрения, позволяя корректировать их в случае изменения ожиданий относительно урожайности. Однако в условиях засухи послепосевное или дробное внесение удобрений может привести к снижению урожайности, особенно когда речь идет о быстрорастущих культурах, таких как масличный рапс. В различных частях региона ЕЭК ООН в зависимости от климатических областей рекомендуемые сроки могут заметно различаться.

308. В течение определенного сезона потери зависят от конкретных погодных условий на момент внесения. Жаркая, сухая погода ведет к низкому использованию азота, поскольку поглощение культурами ограничено, при этом могут возрасти потери из-за улетучивания аммиака. Кроме того, если сразу после внесения питательных веществ идут ливневые дожди, это может привести к большим потерям через стоки и выщелачивание. Таким образом, оптимальным является выбор такого времени, которое характеризуется идеальными условиями для вегетации (теплые, влажные почвы), с небольшим количеством осадков, способствующих доставке внесенного азота в почву и корневую зону растений, причем крайне полезным в этом смысле является использование надежных средств прогнозирования погоды (и основанным на этом инструментах поддержки принятия решений). Вместе с тем, при внесении навоза в теплую почву он будет иметь более высокий показатель выбросов закиси азота и аммиака, чем при внесении в холодные почвы, как это указано в Системе управления сроками внесения, приведенной в Руководящем документе ЕЭК ООН по предотвращению и сокращению выбросов аммиака (Bittman and others, 2014). Аналогичным образом, в прохладную погоду отмечается более низкий показатель испарения аммиака из мочевиновых удобрений (Ni and others, 2014). При наличии системы орошения ее применение в течение кратковременного периода (например, 5 мм) после внесения азотного удобрения облегчает распределение азота внутри почвы и снижает испарение аммиака. В случае мочевинового удобрения выпадение >5 мм осадков после внесения (или использование орошения, см., например, Sanz-Cobena and others, 2011; Viero and others, 2015) снижает риск потерь аммиака, но при внесении мочевины во влажную почву или при выпадении небольших осадков непосредственно после внесения удобрений потери азота могут быть весьма значительными. Это особенно важно при поверхностном ленточном внесении мочевины из-за высокого

риска испарения аммиака, связанного с более существенным повышением pH при ленточном внесении во влажную почву.

309. Одновременное применение органических добавок и минеральных удобрений может быть нецелесообразным. Например, было доказано, что в отличие от раздельного по времени внесения навозной жижи крупного рогатого скота и азотных удобрений, их комбинированное внесение приводит к увеличению выбросов N<sub>2</sub>O за счет денитрификации из-за повышения количества доступного углерода и влажности почвы (например, Stevens and Laughlin, 2002). Следует также избегать одновременного внесения известковых и мочевинных удобрений, которое может привести к увеличению выбросов NH<sub>3</sub> за счет повышения pH на поверхности почвы и растений. Сообщалось, что известкование может приводить к сокращению выбросов N<sub>2</sub>O (Hénault and others, 2019), хотя необходима дальнейшая оценка потенциала и ограничений этого метода в контексте комплексного управления азотом.

310. Конкретные расходы, связанные с такими мерами, относительно невелики, и на практике может быть достигнута экономия средств.

Таблица V.3

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 3**

Форма азота	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub>	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓	↓	↓	↓	↓	↓

<sup>a</sup> Определить исходный показатель для этой меры представляется сложным; в странах ЕЭК ООН, как правило, подкормка осуществляется вне основных вегетационных периодов, например, внесение навоза в сельскохозяйственные почвы производится в зимний период из-за недостаточной вместимости хранилищ навоза.

**Полевая мера 4: Внесение питательных веществ в надлежащей форме**

311. Эта мера в первую очередь направлена на сокращение выбросов аммиака. Мочевина является наиболее широко используемым в мире видом удобрения из-за ее доступности и цены, и, хотя в Европе она используется пропорционально меньше, она все же составляет значительную долю используемых азотных удобрений (около 25 % согласно данным Международной ассоциации производителей удобрений). Используется также мочевино-аммониевый нитрат, который обычно имеет форму жидкого удобрения и характеризуется промежуточными свойствами между мочевиной и нитратом аммония. После внесения в почву мочевина подвергается гидролизу с образованием карбоната аммония (скорость реакции зависит от температуры, влажности и присутствия фермента уреазы). Этот процесс приводит к росту pH вокруг гранул мочевины и увеличивает вероятность выбросов аммиака (обычно это 10–20 % от вносимого азота для типовой системы поверхностного внесения крупнозернистой мочевины, в зависимости от температуры и влажности почвы). В случае использования таких форм удобрений, как нитрат аммония, наблюдается иная ситуация: аммоний будет находиться в равновесии при гораздо более низком pH, что значительно снижает вероятность испарения аммиака (обычно менее 5 % от вносимого азота).

312. Ленточное внесение мочевины на поверхности почвы может привести к увеличению выбросов (за счет концентрации участков гидролиза мочевины, локального увеличения pH), а заделка мочевины в почву (например, на глубину 5 см) позволяет значительно сократить выбросы, благодаря отсутствию прямого контакта с воздухом (принцип 15). Путем замедления гидролиза мочевины ингибиторы уреазы (полевая мера 13) способствуют сокращению выбросов NH<sub>3</sub> за счет снижения степени увеличения pH в непосредственной близости от удобрения. Сульфат аммония может провоцировать высокие выбросы аммиака при его внесении в известковую почву, при

этом сокращения потерь можно добиться с помощью замены на нитрат аммония (Bittman and others, 2014). Бикарбонат аммония — дешевое неорганическое удобрение, которое широко используется во всем мире, однако оно характеризуется очень высоким потенциалом выбросов аммиака, если только он не вносится в почву немедленно. В настоящее время использование бикарбоната аммония запрещено согласно приложению IX к Гётеборгскому протоколу.

313. Существует риск увеличения потерь в результате денитрификации и/или выщелачивания и стока из-за того, что дополнительный доступный азот удерживается в почве вследствие использования альтернативного типа удобрений с низким уровнем выбросов. Однако если снизить норму внесения азота с поправкой на сокращение потерь при улетучивании аммиака и более высокую отзывчивость почв, то этих рисков можно избежать (Sanz-Cobena and others, 2014). Это отражает общий принцип, согласно которому для достижения максимальной эффективности мер по снижению выбросов/смягчению последствий методы сокращения потерь азота должны сопровождаться уменьшением поступления азота в почву (или увеличением поглощения культурой и ростом урожайности) (принцип 6, глава III).

314. Затраты, связанные с применением этой меры, зависят от соотношения цен на различные виды удобрений; при рассмотрении преимуществ различных форм удобрений необходимо также учитывать все соответствующие изменения норм их внесения (например, при снижении выбросов и выщелачивания азота потребуется меньше удобрений).

315. В случае навоза выбор его формы (жидкий или твердый; навоз крупного рогатого скота, свиней или домашней птицы) обычно невозможен, поскольку это зависит от того, какой навоз производится в конкретном хозяйстве или по соседству. Однако, при наличии выбора, рекомендуется использовать твердый навоз только на пашне и в то время, когда он может быть перемешан с почвой сразу после внесения. В рамках полевых мер 8 и 9 особое внимание уделяется конкретным действиям по изменению формы органического навоза с целью снижения потерь азота.

316. При использовании органических материалов, таких как навоз домашнего скота, неорганические формы азота (аммоний и нитрат), содержание которых в навозной жиже выше, чем в стойловом навозе, являются более доступными для усвоения растениями и, следовательно, имеют более высокую ценность с точки зрения замещения неорганических азотных удобрений, но при этом в большей степени подвержены потерям в окружающую среду, если норма, сроки и методы их внесения не соответствуют оптимальным. Более широкие возможности для уменьшения потерь и обеспечения роста эффективности использования азота имеются при применении навоза с повышенной долей мочевины (свиной навоз) или мочевой кислоты (птичий навоз) по сравнению с такими видами навоза, которые обычно содержат более высокую долю медленно разлагающихся органических соединений (например, навоз, продуцируемый в экстенсивном животноводстве). Это связано с тем, что регулировать время высвобождения азота в процессе минерализации медленно разлагающегося органического вещества сложнее. Существуют возможности для совершенствования методов обращения со всеми видами навоза с целью снижения потерь азота.

Таблица V.4

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 4**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	1–2 <sup>a</sup>					
Степень воздействия	↓	↓	↓	↓	↓	↓

<sup>a</sup> Эффективность этой агрегированной меры будет различаться в зависимости от того, какая конкретная мера выбрана.

317. Для сравнения с возможными способами оптимизации для различных «форм азота» могут быть приняты следующие базовые методы в отсутствие каких-либо мер по сокращению потерь:

а) базовая технология без применения мер по сокращению потерь для синтетического искусственного неорганического удобрения представляет собой внесение в почву крупнозернистой мочевины (поверхностное внесение);

б) базовая технология без применения мер по сокращению потерь для навоза представляет собой навоз без каких-либо химических модификаций (например, без добавок, изменяющих pH, содержание воды, активность ферментов и т. д.) — либо свежий навоз, либо после трех месяцев непокрытого хранения на открытом воздухе:

i) жидкая смесь экскрементов и мочи или помета домашней птицы (например, «жидкий навоз»);

ii) твердая смесь экскрементов и мочи, включая подстилку («стойловый навоз»);

iii) твердая смесь птичьего помета, включая подстилку («птичий помет»).

#### **Полевая мера 5: Ограничение или отказ от внесения удобрений на участках повышенного риска**

318. Определенные участки в пределах хозяйства (или в пределах ландшафта — см. главу VI) могут быть отнесены к участкам повышенного риска с точки зрения потерь азота через воду в результате прямого стока или выщелачивания, или через воздух путем денитрификации. Могут быть разработаны карты рисков для конкретных хозяйств с указанием уязвимых участков, на которых следует ограничить внесение удобрений и/или органических добавок или отказаться от него. К ним могут относиться участки вблизи построек, на которых в прошлом вносились большие объемы навоза и которые могут быть обозначены как «горячие точки Р».

319. Риски прямого переноса в уязвимые водоемы включают перенос из: участков поля, непосредственно граничащих с поверхностными водами, такими как каналы, ручьи, реки, озера и пруды, или находящихся вблизи скважин питьевого водоснабжения; свободно дренируемых почв над водоносными горизонтами; и на крутых склонах к водоемам. Расширяющиеся глинистые почвы особенно подвержены выщелачиванию через макропоры. Риски переноса могут быть снижены путем выделения зон, в которых удобрения и навоз вноситься не должны, или в которых должны быть строго регламентированы нормы и сроки внесения (например, нитратно-уязвимые зоны на территории Европейского союза).

320. Участки поля, которые обычно остаются более влажными, например, участки с впадинами или уплотненные участки с почвой тонкого гранулометрического состава, могут характеризоваться более интенсивной денитрификацией и, следовательно, более высокими потерями азота в виде  $N_2O$ ,  $NO_x$  и  $N_2$ . Избежать таких потерь позволит снижение до минимума объемов внесения азота на этих участках. Однако обрабатываемые водно-болотные угодья часто используются для того, чтобы стимулировать денитрификацию с целью минимизации ущерба от избытка азота. Для денитрификации азота из стоков с полей, можно использовать специально созданные «биореакторы» (см. ландшафтную меру 5); собранная вода может храниться для возможного последующего использования с целью орошения. Хотя такая практика может уменьшить сток нитратов, увеличение выбросов диазота снижает эффективность использования азота на уровне ландшафта и может привести к увеличению потерь азота в других формах. Решение этой проблемы заключается в отказе от внесения азота на участках с повышенным риском. Как отмечается ниже в главе VI, помочь защитить участки, примыкающие к водоемам, могут буферные и лесные полосы.

Таблица V.5

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 5**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>				
Степень воздействия	~ <sup>b</sup>	↓	↓	↓	↓	↓

<sup>a</sup> Определить общий исходный показатель для этой меры представляется сложным, поскольку каждую ситуацию необходимо оценивать в контексте.

<sup>b</sup> Ландшафтные меры, связанные со смягчением воздействия  $NH_3$ , описаны в главе VI.

**Меры, связанные исключительно с внесением навоза и других органических материалов**

321. В настоящем разделе основное внимание уделяется мерам, касающимся внесения в почву различных видов навоза домашнего скота. Эти меры могут также применяться в случае внесения других органических отходов, в том числе дигестата, полученного путем анаэробного сбраживания, необработанного осадка и компоста, применимость и показатели сокращения загрязнения которых зависят от конкретных физико-химических характеристик материала. Обзор использования органических добавок в сельском хозяйстве представлен в Goss and others (2013).

**Полевая мера 6: Ленточное разбрызгивание навозной жижи и ее внесение с помощью волочильного башмака**

322. Эта мера в первую очередь направлена на снижение потерь в результате испарения аммиака (Bittman and others, 2014) с поверхности вносимой навозной жижи. Сокращение общей площади поверхности навозной жижи путем ее внесения узкими полосами ведет к сокращению выбросов аммиака по сравнению с поверхностным внесением путем разбрызгивания, особенно в дневное время, когда условия для испарения являются более благоприятными. Повышение гидравлической нагрузки при ленточном внесении приводит к снижению скорости инфильтрации, в результате чего выбросы могут происходить более длительное время, чем при разбрызгивании, но этот длительный период выбросов обычно приходится на ночное время, когда условия для испарения являются менее благоприятными. Кроме того, если навозная жижа вносится под растительным пологом или стерней, то загрязнение растительного полога будет меньше, при этом он создает физический барьер для воздушного потока и воздействия солнечных лучей, что еще больше снижает интенсивность улетучивания аммиака.

323. Навозная жижа может вноситься узкими полосами с помощью буксируемых шлангов, которые закреплены на раме и касаются поверхности почвы или расположены чуть выше нее (NB: некоторые так называемые «дриббл-бары», которые распределяют навозную жижу через шланги-трубочки, расположенные значительно выше поверхности почвы, являются менее эффективными с точки зрения снижения выбросов, так как полосы навозной жижи становятся более широкими; важно, чтобы навозная жижа подавалась из шлангов непосредственно на поверхность почвы или чуть выше нее). Вместе с тем при ленточном разбрызгивании также увеличивается гидравлическая нагрузка на единицу площади, что в ряде случаев (особенно при высоком содержании сухого вещества в навозной жиже) может снижать эффективность инфильтрации. При более высоких растениях навозная жижа вносится под растительный полог, что приводит к снижению движения воздуха и температуры поверхности, с которой происходят выбросы, и сокращению выбросов аммиака. Внесение с помощью буксируемых шлангов особенно подходит для пропашных культур в весенний период (например, озимая пшеница, масличный рапс), когда большая ширина рамы позволяет вносить удобрения с использованием существующей постоянной колеи. Наиболее благоприятный период для внесения навоза с помощью

буксируемого шланга приходится на вторую половину весны, когда высота растений, как правило, исключает обычную поверхностную заделку (из-за риска повреждения и заражения растений). Использование буксируемого шланга обычно снижает выбросы  $\text{NH}_3$  на 30–35 % (Bittman and others, 2014).

324. Внесение с помощью волоочильных «башмаков» более эффективно, чем внесение с помощью буксируемых шлангов, и больше подходит для лугопастбищных угодий. «Башмак» раздвигает травяной покров, после чего навоз укладывается узкой полосой непосредственно на поверхность почвы. Травяной покров смыкается над полосой внесенного навоза, тем самым дополнительно препятствуя улетучиванию аммиака. Эта технология более эффективна при работе с более высокой стерней (т. е. при большей высоте среза) или если после выпаса или скашивания силоса предусматривается короткий период (например, одна неделя) для роста травостоя. Использование волоочильных «башмаков» позволяет обеспечить сокращение выбросов  $\text{NH}_3$  на 30–60 %, причем наибольшее сокращение достигается при внесении навоза под листовенный полог (Bittman and others, 2014).

325. Ленточное разбрызгивание может привести к увеличению потерь азота путем денитрификации из-за более низких потерь аммиака и более концентрированного внесения в почву содержащегося в навозной жиже азота, доступного углерода и влаги. Однако риск значительного увеличения невелик, так как нанесенные полосы навоза успевают высохнуть до начала выбросов, особенно если внесение производится в оптимальное с агрономической точки зрения время (прохладная погода и недопущение избыточной влажности почвы) и в надлежащем объеме.

326. Дополнительный выигрыш при использовании состоит в том, что улучшается эффективное соотношение N:P вносимого навоза за счет сокращения потерь азота на каждом этапе операций с навозом. Последующее внесение минеральных азотных удобрений также улучшает соотношение N:P, однако при этом объем дополнительного азота следует сократить с учетом повышения доступности азота во вносимой навозной жиже, обусловленного снижением потерь аммиака. Другими важными сопутствующими выгодами являются более точное и равномерное и меньшее боковое смещение.

327. Хотя первоначальные капитальные затраты на оборудование относительно высоки, а также требуются определенные эксплуатационные расходы, за весь срок службы оборудования затраты окупаются за счет экономии на удобрениях. Критически важным элементом является распределительная головка, которая может быть или не быть оснащена измельчителем, поскольку именно она определяет степень равномерности распределения потока и образование или снижения закупоривания, особенно в случае навоза крупного рогатого скота. Организация местного производства машин для внесения удобрений помогает снизить затраты и поддержать местные предприятия. Для многих фермерских хозяйств по практическим и экономическим причинам будет выгоднее воспользоваться услугами подрядных организаций, специализирующихся на оборудовании для внесения навозной жижи. Дополнительными сопутствующими выгодами являются эстетические соображения, уменьшение неприятного запаха и улучшение взаимоотношений с местным населением, отчасти потому, что операции по внесению навоза будут менее заметны.

Таблица V.6

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 6**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓↓↓	~↑↓ <sup>b</sup>	~↑↓ <sup>b</sup>	~↑↓ <sup>b</sup>	~↑↓ <sup>b</sup>	↓ <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Исходным показателем по данному методу является поверхностное разбрызгивание хранимого жидкого навоза (навозной жижи) без какой-либо специальной обработки.

<sup>b</sup> Несмотря на определенный риск замены выбросов аммиака другими формами потери азота из навозной жижи, анализ в масштабе хозяйства и ландшафта указывает на наличие возможностей снижения этих потерь азота, поскольку повышение эффективности использования азота в результате применения данной меры позволяет сократить поступление свежего азота. Сокращаются также косвенные выбросы  $N_2O$  и  $NO_x$  в результате осаждения атмосферного аммиака на лесные массивы и другие земли.

**Полевая мера 7: Внесение навозной жижи инжектором**

328. Эта мера направлена в первую очередь на снижение потерь в результате испарения аммиака. Инжектирование навозной жижи в узкие неглубокие поверхностные борозды (глубиной около 5 см) значительно уменьшает площадь полосы и, следовательно, площадь открытой поверхности навозной жижи. Внесение навоза в более глубокие слои почвы за культиваторными лапами позволяет по большей части избежать наличия открытой поверхности навозной жижи как в случае закрытой борозды (глубина 10–20 см с интервалом 15–30 см) и глубокой заделки (глубина около 20–30 см с интервалом не менее 30 см), так и при использовании лопаточных насадок. Часть нитрата аммония, содержащегося во вносимой в почву навозной жиже, может также фиксироваться частицами глины, что дополнительно снижает уровень выбросов аммиака. Сокращение выбросов аммиака по сравнению с поверхностным внесением путем разбрызгивания, как правило, составляет 70 % при неглубоком инжекторном внесении и более 90 % при инжекторном внесении в закрытую борозду или глубокой заделке (Bittman and others, 2014).

329. При инжекторном внесении навозной жижи выбросы закиси азота (и, соответственно,  $NO_x$  и  $N_2$ ) могут увеличиваться за счет создания в почве зон с высоким содержанием доступного азота, разлагаемого углерода и влаги, что способствует денитрификации. Однако риск значительного повышения снижается, если внесение производится в оптимальное с агрономической точки зрения время (прохладная почва), в надлежащем объеме и при не переувлажненной почве (Sanz-Cobena and others, 2019), а также может быть уменьшен с помощью ингибитора нитрификации. При последующем внесении минеральных азотных удобрений следует учитывать повышенную доступность азота во вносимой навозной жиже, обусловленную снижением потерь аммиака. Инжекторное внесение навозной жижи позволяет снизить загрязнение культур и уменьшить неприятный запах по сравнению с поверхностным разбрызгиванием. Однако использование тяжелой техники повышает механическую нагрузку на почву, энергопотребление и может приводить к уплотнению почвы.

330. Неглубокое инжекторное внесение наиболее подходит для лугопастбищных угодий, где отсутствуют ограничения, связанные с уклоном полей и/или их каменистостью, а также для пахотных земель до формирования растений. При неглубоком инжекторном внесении борозды могут вмещать не более, чем примерно 30 м<sup>3</sup> навозной жижи на гектар. Напротив, глубокая инжекторная заделка наиболее подходит для пахотных земель до формирования растений; современные конструкции глубоких инжекторов, как правило, не подходят для применения во время вегетационного периода, так как культуры могут быть сильно повреждены, хотя метод глубокого инжектирования иногда используется для внесения навоза между рядами

кукурузы на песчаных почвах. Рабочие нормы внесения при использовании любых инжекторных систем ниже (особенно при глубокой заделке) из-за уменьшения скорости движения и более узкого охвата, чем при обычном поверхностном разбрызгивании, но скорость разбрызгивания при этом выше, а уплотнение почвы снижается при использовании систем подачи навоза через «пуповинный» шланг. В жарких и сухих условиях инжекторное внесение может привести к значительному повреждению травостоя вследствие усечения корневой системы. При неглубоком инжекторном внесении (особенно разбавленной навозной жижи) на склонах навоз может стекать вдоль инжекторных борозд. При глубокой заделке важно избегать внесения навозной жижи непосредственно в гравийную засыпку дренажных труб. Воздействие на почву при глубокой заделке может быть несовместимо с системами нулевой обработки почвы. Точечная высадка кукурузы в пределах 10 см от борозд глубокой заделки может избавить от необходимости использования стартового Р-удобрения, что представляет собой сопутствующую выгоду (см., например, Bittman and others, 2012).

331. Хотя первоначальные капитальные затраты на оборудование относительно высоки, а также требуются определенные текущие эксплуатационные расходы, включая более высокий расход топлива и потребность в более высокой тяговой силе, однако в течение всего срока службы оборудования эти затраты окупаются (возможно, полностью) за счет экономии на удобрениях. Для многих фермерских хозяйств по экономическим соображениям будет целесообразно воспользоваться услугами подрядных организаций, специализирующихся на оборудовании для внесения навозной жижи.

Таблица V.7

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 7**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓↓	~↑↓ <sup>b</sup>	~↑↓ <sup>b</sup>	~↑↓ <sup>b</sup>	~↑↓ <sup>b</sup>	↓↓

<sup>a</sup> Базовым показателем по данному методу является поверхностное разбрызгивание хранимого жидкого навоза (навозной жижи) без какой-либо специальной обработки.

<sup>b</sup> Несмотря на определенный риск замены выбросов аммиака другими формами потери азота из навозной жижи, анализ в масштабе хозяйства и ландшафта указывает на наличие возможностей снижения этих потерь азота, поскольку повышение эффективности использования азота в результате применения данной меры позволяет сократить поступление свежего азота. Сокращаются также косвенные выбросы  $N_2O$  и  $NO_x$  в результате осаждения атмосферного аммиака на леса и другие земли.

**Полевая мера 8: Разбавление навозной жижи**

332. Эта мера направлена в первую очередь на снижение потерь в результате испарения аммиака. Известно, что потери аммиака после поверхностного внесения навозной жижи путем разбрызгивания имеют положительную корреляцию с содержанием и вязкостью сухого вещества в навозной жиже, и таким образом объем потерь уменьшается при снижении содержания сухого вещества в навозной жиже из-за более быстрого просачивания навоза в почву (см., например, Beudert and others, 1988; Sommer and Olesen, 1991; Misselbrook and others, 2005). Величина снижения выбросов аммиака зависит от характеристик неразбавленной навозной жижи, а также от почвенных и погодных условий на момент внесения навоза в почву, однако для достижения 30-процентного сокращения выбросов необходимо разбавить навозную жижу водой как минимум в соотношении 1:1 (Bittman and others, 2014, para. 146).

333. Этот метод особенно подходит для систем, позволяющих производить внесение навозной жижи (или дигестата) с помощью «пуповинных» шлангов или труб и систем орошения/фертигации, так как добавление воды значительно увеличивает объем навозной жижи и, следовательно, издержки и вероятность уплотнения почвы при внесении с помощью цистерновых систем. Этот метод не подходит для систем капельной фертигации из-за проблем с закупориванием трубок, если только не используется метод микрофльтрации (см. комментарии к полевой мере 16). Применимость этой меры также определяется доступностью воды для разбавления навоза. Вода может также разбавлять навоз случайным образом в процессе мытья доильных залов и в результате попадания дождевой воды в хранилища навозной жижи, что, хотя изначально и не предусмотрено, но имеет тот же эффект. Внесение в почву должно осуществляться в те сроки и в тех объемах, которые соответствуют потребностям культур в воде и питательных веществах. Существует риск увеличения потерь за счет денитрификации из-за дополнительного повышения влажности почвы, но риск значительного увеличения потерь невелик, если обработка почвы проводится в оптимальное с агрономической точки зрения время и в приемлемых объемах. Как и в случае всех остальных мер, при последующем внесении минеральных азотных удобрений следует учитывать повышенную доступность азота во вносимой навозной жиже, обусловленную снижением потерь аммиака.

334. Затраты на системы внесения навоза, при которых перевозка навозной жижи осуществляется с помощью трактора и цистерны, очень высоки и зависят от расстояния перевозки и вместимости цистерны. Адаптация/установка систем орошения требует умеренных затрат, которые в определенной степени компенсируются за счет экономии средств благодаря отсутствию необходимости разбрызгивания навозной жижи с помощью цистерн и частично за счет экономии на удобрениях. На некоторых крупных молочных фермах в Соединенных Штатах Америки доставка разбавленного дождевой водой навоза на поля осуществляется по подземным трубопроводам.

Таблица V.8

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 8**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓↓	~↑	~↑	~↑	~↑	↓

<sup>a</sup> Базовым методом для сравнения с этой мерой является внесение неразбавленной навозной жижи.

**Полевая мера 9: Подкисление навозной жижи (во время внесения в поля)**

335. Эта мера направлена в первую очередь на снижение потерь из-за испарения аммиака. Как и в случае подкисления навозной жижи в животноводческих помещениях или хранилищах (содержание животных в помещениях — мера 8 и управление навозом — мера 8 соответственно), более низкий показатель pH благоприятствует тому, что аммиачный азот в растворе переходит в форму аммония, а не аммиака, и, таким образом, не так подвержен испарению, и снижение показателя pH навозной жижи до значения 6 или меньше позволяет существенно сократить выбросы. Обычно для снижения pH используется серная кислота, потому что она является более доступной и дешевой, чем другие кислоты. Требуемый объем кислоты будет зависеть от текущего показателя pH навозной жижи (обычно в диапазоне 7–8) и буферной способности. Добавление кислоты в процессе внесения навозной жижи с использованием цистерн специальной конструкции, как правило, менее эффективно, чем предварительное подкисление на ферме или в хранилище (при этом может быть достигнуто снижение >80 %), а сокращение выбросов обычно

составляет 40–50 %. Количественное воздействие подкисления навозной жижи на выбросы закиси азота после внесения навозной жижи изучено хуже, хотя ряд данных указывает на сокращение выбросов. Мало изучено также потенциальное воздействие на состояние почвы.

336. Расходы, связанные с использованием систем подкисления в полевых условиях, как правило, являются низкими или умеренными, особенно при использовании услуг подрядчиков. Эти расходы частично или полностью компенсируются за счет экономии на удобрениях. На полях, где применяется подкисленная навозная жижа, может потребоваться внесение извести; если известь легко доступна, расходы будут невелики, но они должны быть обязательно включены в любые расчеты. Во избежание увеличения выщелачивания норма внесения навозной жижи также должна быть скорректирована с учетом повышения доступности азота. Необходимо соблюдать правила безопасности, чтобы избежать травм в результате ожога концентрированными кислотами и воздействия возможного выделения сероводорода. При транспортировке концентрированной кислоты также требуется соблюдать соответствующие нормы безопасности.

Таблица V.9

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 9**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓↓	~↓	~↓	~	~↓	↓↓

<sup>a</sup> Базовым методом для сравнения с этой мерой является внесение в поле навозной жижи без добавления кислоты.

**Полевая мера 10: Ингибиторы нитрификации (добавки к навозной жиже)**

337. Хотя обычно ингибиторы нитрификации используются с неорганическими удобрениями, их можно также применять в качестве добавки к навозной жиже непосредственно перед внесением в почву для замедления процесса преобразования содержащегося в жиже аммония в нитрат, который более подвержен потерям через денитрификацию, стоки и выщелачивание. Таким образом, снижение пиковых концентраций нитрата в почве и замедление процесса преобразования аммония в нитрат за счет увеличения поглощения азота растениями позволяет снизить выбросы закиси азота и связанных с ней  $NO_x$  и диазота, одновременно повышая эффективность поглощения азота растениями. Эта мера наиболее эффективна в условиях, способствующих высоким потерям через денитрификацию (например, в полуанаэробных почвах с большим количеством доступного азота и углерода для микробной активности) и, как правило, позволяет достичь сокращения выбросов закиси азота на уровне 50 %, хотя существует мнение, что при таких условиях внесения навозной жижи следует избегать (Recio and others, 2018). В тех случаях, когда погодные условия препятствуют своевременному внесению навозной жижи, добавление ингибиторов нитрификации может повысить эффективность использования азота. На эффективность ингибиторов могут влиять почвенные и климатические факторы: они менее эффективны при более высоких температурах или при внесении в почву с мелким гранулометрическим составом и высоким содержанием органического вещества. Ингибиторы нитрификации могут помочь значительно сократить выбросы  $N_2O$  при глубокой заделке навоза инжекторным способом. Они также позволяют сократить потери  $N_2O$  и  $NO_x$ , возникающие непосредственно в процессе нитрификации (в аэробных условиях), которые в некоторых регионах могут составлять значительную долю общих потерь этих газов из почвы.

338. Хотя применение ингибиторов нитрификации в качестве добавки к навозной жиже может привести к увеличению выбросов  $\text{NH}_3$ , на практике это не считается серьезной проблемой, поскольку большая часть выбросов  $\text{NH}_3$  происходит в течение 24 часов после разбрызгивания. Лишь в нескольких исследованиях было отмечено существенное повышение урожайности за счет использования ингибиторов нитрификации в качестве добавки к навозной жиже, однако в зависимости от прогнозируемого снижения потерь азота при внесении навозной жижи можно рассчитывать на снижение (скорее всего, незначительное) требуемого количества азотных удобрений.

339. Хотя расходы на приобретение ингибиторов невысоки, они вряд ли будут полностью компенсированы повышением продуктивности или экономией на удобрениях. Использование такой продукции можно было бы поощрять с помощью инструментов политики.

340. Существует целый ряд формул и разновидностей ингибиторов, прошедших оценку на предмет их воздействия на нитрификацию, однако имеющиеся на сегодняшний день немногие исследования указывают на отсутствие вредных побочных эффектов для здоровья почвы (см., например, O'Callaghan and others, 2010).

Таблица V.10

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 10**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
Степень воздействия	~ — ↑	↓↓	↓↓	↓—↓↓	↓↓	~↓

<sup>a</sup> Базовым методом для сравнения с этой мерой является внесение в почву навозной жижи без добавления ингибиторов нитрификации.

**Полевое измерение 11: Быстрая заделка навоза в почву**

341. Эта мера направлена в первую очередь на снижение потерь в результате испарения аммиака. Быстрая заделка вносимого навоза в почву (в течение первых нескольких часов после внесения) позволяет сократить площадь открытой поверхности навоза и, следовательно, уменьшить потери азота и фосфора через стоки. Данная мера применяется на пахотных землях, на которые навоз вносится до формирования растений. Потери, связанные с испарением аммиака, наиболее значительны сразу после внесения навоза, и до 50 % общих потерь происходит, в зависимости от конкретных условий, в течение первых нескольких часов, поэтому эффективность данной меры определяется возможностью сведения к минимуму времени, в течение которого навоз остается на поверхности почвы, и степенью заделки (которая зависит от метода: плуговое оборачивание пласта почвы, дисковая борона или лаповый культиватор), а также, в некоторой степени, характеристиками навоза. При вспашке сразу после внесения навоза можно добиться сокращения выбросов аммиака на 90 % (Bittman and others, 2014), а при обработке лаповым культиватором через 24 часа после внесения — сокращения до 20 %. Заделка является одним из немногих методов снижения потерь аммиака из твердого навоза (стойловый навоз (СН)) и птичьего помета, хотя некоторые виды твердого навоза при определенном способе хранения могут иметь низкое содержание аммиака. При использовании твердого навоза с учетом необходимости снижения риска стока питательных веществ целесообразно применять заделку в почву, так как глубокая заделка с помощью инжекторов недоступна.

342. При заделке навоза в почву существует вероятность увеличения потерь азота через денитрификацию из-за снижения потерь аммиака и, соответственно, более высокого содержания азота в почве. Тем не менее риск значительного увеличения

невелик, если внесение навоза производится в агрономически оптимальное время и в приемлемых объемах (например, при внесении меньшего количества навоза на гектар с учетом экономии азота). Последующее внесение минеральных азотных удобрений также может быть снижено с учетом повышения уровня доступного азота в почве. Таким образом, эта мера помогает повысить эффективность использования азота, что приводит к общему снижению потерь азота в масштабах всей системы.

343. Расходы, связанные с этой мерой, с учетом необходимости обработки поля, зависят от наличия рабочей силы и оборудования, необходимых для достижения баланса между полной и быстрой заделкой, требуемой после внесения навоза. При оценке затрат следует учитывать экономию за счет снижения потребностей в удобрениях.

Таблица V.11

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 11**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓↓	~↑↓ <sup>b</sup>	~↑↓ <sup>b</sup>	~↑↓ <sup>b</sup>	~↑↓ <sup>b</sup>	↓-↓↓

<sup>a</sup> Базовым методом для этой меры является поверхностное внесение навозной жижи и твердого навоза.

<sup>b</sup> Несмотря на определенный риск замены выбросов аммиака другими формами потери азота из навозной жижи, анализ в масштабе хозяйства и ландшафта указывает на наличие возможностей снижения этих потерь азота, поскольку повышение эффективности использования азота в результате применения данной меры позволяет сократить поступление свежего азота. Сокращаются также косвенные выбросы  $N_2O$  и  $NO_x$  в результате осаждения атмосферного аммиака на лесные массивы и другие земли.

**Меры, связанные с внесением неорганических удобрений**

**Полевая мера 12: Замена мочевины альтернативным азотным удобрением**

344. Эта мера в первую очередь направлена на сокращение выбросов  $NH_3$ . При описании полевой меры 4 уже отмечалось, что использование мочевины и удобрений на основе мочевины может привести к значительным потерям азота в результате испарения  $NH_3$ . В условиях, благоприятных для выбросов (теплая или жаркая погода при наличии умеренного количества воды, когда потери могут составлять >20–30 % от вносимого азота), замещение мочевины другим типом азотного удобрения, таким как нитрат аммония (кальция), позволит значительно сократить объем выбросов аммиака (Bittman and others, 2014). Однако при внесении мочевины весной, в условиях предсказуемой прохлады и влажности, риск потери аммиака значительно снижается (потери составляют <10 % от вносимого азота). Вместе с тем даже в прохладную погоду потери  $NH_3$  при поверхностном внесении мочевины, как правило, гораздо выше, чем при использовании нитрата аммония (в этом случае потери в такую погоду также оказываются меньше). Замещение мочевины на нитрат аммония (кальция) в известковых и полусухих почвах, как правило, также приводит к снижению объема выбросов  $N_2O$  и  $NO$ .

345. Потери могут увеличиваться в результате денитрификации и/или выщелачивания из-за того, что дополнительный доступный азот удерживается в почве вследствие использования альтернативного типа удобрений с более низким уровнем выбросов  $NH_3$ . Однако если снизить норму внесения азота в соответствии с сокращением потерь при испарении  $NH_3$  и более высокой отзывчивости почвы, то этих рисков удастся избежать (Принцип 6). С общесистемной точки зрения необходимость использования меньшего количества удобрений указывает на более высокую

эффективность использования азота при общем снижении потерь азота на единицу продовольственной продукции.

346. Затраты, связанные с применением этой меры, зависят от соотношения цен на мочевины и другие виды удобрений; следует также принимать во внимание все последующие изменения норм внесения удобрений.

Таблица V.12

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 12**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓↓	~↑↓	~↑↓	~	~ ?	↓-↓↓

<sup>a</sup> Базовым методом для этой меры является поверхностное внесение крупнозернистой мочевины (или обогащенного мочевиной водного раствора).

**Полевая мера 13: Ингибиторы уреазы**

347. Эта мера в первую очередь направлена на сокращение выбросов аммиака в результате использования удобрений на основе мочевины. Ингибиторы уреазы, такие как N-(н-Бутил)тиофосфорный триамид (NBPT) или другие подобные продукты, замедляют гидролиз мочевины путем ингибирования фермента уреазы в почве. Благодаря замедлению гидролиза мочевины увеличивается продолжительность «вымывания» мочевины в почву, что защищает высвобождающийся аммиак и за счет увеличения продолжительности гидролиза замедляет темпы повышения показателя pH почвы вблизи гранул мочевины и, тем самым, снижает уровень выбросов аммиака в атмосферу. Сообщается, что использование ингибиторов позволяет снизить выбросы аммиака из гранулированного мочевинового удобрения на 70 % (Bittman and others, 2014). Степень эффективности может зависеть от почвенных и климатических особенностей (хотя эта взаимосвязь изучена пока еще недостаточно), однако, скорее всего, она будет наибольшей в условиях, наиболее благоприятствующих высокой испаряемости аммиака.

348. В ходе некоторых исследований в результате использования ингибиторов уреазы также удалось добиться сокращения выбросов  $N_2O$  и  $NO_x$  (Sanz Cobena and others, 2016), что, по всей видимости, объясняется более медленным преобразованием мочевины в аммоний, а следовательно, и более низкой скоростью достижения пиковой концентрации аммония, который является субстратом для процессов нитрификации/денитрификации, приводящих к таким выбросам. Кроме того, ряд данных указывает на то, что в определенных полевых условиях добавление NBPT значительно сокращает популяцию окисляющих аммиак бактерий, вероятно, потому что NBPT обладает способностью ингибировать уреазу в клетках окисляющих аммиак бактерий, ограничивая, таким образом, доступность аммиака для межклеточной нитрификации. Однако существует потенциальный риск увеличения потерь в результате денитрификации и/или выщелачивания и стока из-за того, что дополнительный доступный азот удерживается в почве вследствие сокращения потерь при испарении аммиака. Однако если снизить норму внесения азота, чтобы учесть сокращение потерь при испарении аммиака, то этих рисков удастся избежать. После внесения в почву ингибирующий эффект длится относительно недолго (несколько дней), поэтому задержка в поступлении азота к корням растений минимальна. Существует вероятность того, что ингибированная мочевина, в отличие от аммония, будет вымываться при сильных дождях. Ингибиторы уреазы могут использоваться в комбинации с ингибиторами нитрификации (см. полевую меру 14).

349. Другая цель применения ингибиторов уреазы — обеспечение более высокой нормы внесения азота вблизи семян (в бороздах, при ленточном внесении сбоку рядка

с помощью сеялки или при междурядной подкормке после появления всходов; см. внесение удобрений, полевая мера 17), что может повысить эффективность и снизить затраты.

350. Несмотря на отсутствие всесторонней оценки потенциального воздействия ингибиторов уреазы на состояние почвы, результаты проведенных на сегодняшний день исследований свидетельствуют об отсутствии негативных последствий (например, Ruzek and others, 2014).

Таблица V.13

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 13**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓↓	~↓	~↓	~	~↓	↓↓

<sup>a</sup> Базовым методом для этой меры является поверхностное внесение крупнозернистой мочевины (или водного раствора, обогащенного мочевиной) без ингибиторов уреазы.

**Полевая мера 14: Ингибиторы нитрификации (с неорганическими удобрениями)**

351. Ингибиторы нитрификации (такие как DCD, DMPP) — это химические вещества (экологически и фармацевтически безопасные противомикробные препараты), которые могут быть включены в состав удобрений на основе аммиака или мочевины и которые замедляют скорость преобразования (окисления) аммония в нитрат. Принцип заключается в том, что доступность нитрата для культур лучше синхронизируется с потребностью в нем культур, что приводит к повышению урожайности, но это зависит от таких факторов окружающей среды, как достаточная влажность почвы во время вегетационного периода. Важно отметить, что достигается снижение пиковой концентрации нитрата в почве, а это ведет к уменьшению потерь азота через воздух в результате денитрификации, а также к снижению риска выщелачивания и стока нитратов. Обычно величина сокращения выбросов закиси азота составляет 35–70 % (см., например, Akiyama and others, 2010), при этом эффективность в некоторой степени зависит от почвенно-климатических факторов (эффективность ниже при более высоких температурах и при внесении в почвы с мелким гранулометрическим составом и высоким содержанием органического вещества). Можно ожидать аналогичного сокращения выбросов  $NO_x$  и  $N_2$ , поскольку они происходят в результате одних и тех же процессов, однако данные по этому вопросу ограничены. Применять ингибиторы нитрификации на пастбищах для молочного скота следует с большой осторожностью, с тем чтобы не допустить их попадания в молоко (так как из организма животных они не выводятся). Выражалась обеспокоенность в связи с более масштабными негативными последствиями для нецелевых наземных и водных организмов, однако существование таких последствий пока не доказано.

352. Некоторые исследования указывают на то, что использование ингибиторов нитрификации может привести к увеличению выбросов  $NH_3$  (Kim and others, 2012), поскольку азот удерживается в аммониевой форме дольше, хотя данные не противоречивы (см., например, Ni and others, 2014). Несмотря на то, что сообщалось о небольшом положительном воздействии на урожайность (Abalos and others, 2014), имеются также данные о том, что в некоторых случаях усвоение азота растениями может замедляться из-за задержки поступления нитратов в почву, что отрицательно влияет на урожайность и содержание азота, поэтому внесение удобрений должно быть тщательно спланировано по времени. Например, может быть целесообразно вносить удобрения, содержащие ингибиторы нитрификации, чуть раньше обычных удобрений с учетом этой задержки в поступлении азота в растения, или смешивать удобрения с

ингибиторами и без них, что позволяет также снизить расходы. Следует обратить внимание на то, что раздельное внесение удобрений по своему воздействию аналогично использованию таких ингибиторов, но влечет за собой дополнительные трудозатраты и может быть невозможно при плохих полевых условиях. Раздельное внесение позволяет проводить анализ культур на предмет потребностей в азоте («прецизионное» сельское хозяйство), но удобрения, имеющие отсроченное воздействие, должны вноситься на ранней стадии, поэтому в меньшей степени совместимы с тестированием культур на поле.

353. Использование удобрений с ингибиторами нитрификации повышает расходы, которые едва ли будут полностью компенсированы повышением урожайности или сокращением использования удобрений, поэтому фермеры менее склонны к использованию продуктов такого типа (если только цены на них не упадут). Однако в тех случаях, когда речь идет об устранении экологических рисков, таких как выщелачивание нитратов и выбросы закиси азота, для поощрения их использования могут быть задействованы инструменты политики.

354. Существует целый ряд формул и разновидностей ингибиторов, которые прошли оценку на предмет их воздействия на нитрификацию, однако комплексной оценки воздействия ингибиторов или их остатков на характеристики почвы и здоровье животных и человека не проводилось. Вместе с тем, имеющиеся на сегодняшний день немногие исследования указывают на отсутствие негативных воздействий (см., например, O'Callaghan and others, 2010).

355. Использование различных мочевинных удобрений, содержащих двойные ингибиторы (уреазы и нитрификации — сочетание полевых мер 13 и 14), с целью одновременного сокращения выбросов  $NH_3$ ,  $N_2O$  и  $NO_x$  является дополнительной мерой и может быть эффективным, однако для понимания факторов, влияющих на эффективность таких продуктов, обоснования дополнительных расходов и вынесения рекомендаций необходимы дальнейшие исследования.

Таблица V.14

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 14**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1–2 <sup>a</sup>
Степень воздействия	~↑	↓↓	↓↓	↓–↓↓	↓↓	↓↓

<sup>a</sup> Базовым методом для этой меры является поверхностное внесение азотсодержащего удобрения без ингибиторов нитрификации.

**Полевая мера 15: Удобрения контролируемого действия**

356. Удобрения с серным и полимерным покрытием, многие из которых изготовлены на базе мочевины, работают по принципу постепенного разрушения покрытия или зависящей от температуры диффузии и высвобождения в почву необходимых растениям питательных веществ в течение длительного периода времени (например, нескольких месяцев), в зависимости от толщины и состава покрытия. Такое контролируемое высвобождение питательных веществ позволяет снизить потери азота через выщелачивание и газообразование, особенно в случае мочевины, когда постепенное высвобождение характеризуется гораздо меньшим повышением pH и, следовательно, меньшими потерями, связанными с испарением аммиака (Bittman and others, 2014). Такие виды удобрений также обеспечивают логистические преимущества, так как удобрения требуется вносить реже, а всходы более устойчивы к внесению удобрений (см. полевую меру 17), особенно в условиях ограниченной вспашки. В зависимости от характеристик продукции разрушение покрытия может зависеть от температуры, влажности почвы или микробного

воздействия; с целью получения регистрации (например, в Канаде) были проведены анализы остаточных полимеров (или микропластика) в почве, однако результаты приняты не во всех странах, и пока недостаточно изучены потенциальные последствия разложения полимерных покрытий, приводящего к образованию микропластика.

357. Органические азотные удобрения с низкой растворимостью в воде, такие как изобутилидендикарбамид (IBDU), кротонилидендикарбамид (CDU) и метилен-мочевинные полимеры, также считаются удобрениями с низкой скоростью действия. В этом случае азот высвобождается медленно из-за химического или микробного разложения. Период высвобождения (обычно около 4 месяцев) очень сильно зависит от условий влажности и характеристик полимеров (формы мочевины).

358. Повышение эффективности использования азота в первую очередь обусловлено доступностью для растений высвобождаемых форм азота и синхронизацией с потребностями растений в азоте. Этого может быть трудно добиться, причем определяющими будут факторы воздействия на скорость высвобождения удобрений и их вариация в зависимости от сезона и года. Такие продукты имеют больший потенциал для сельскохозяйственных культур с более длительным вегетационным периодом при обеспечении надлежащей влажности в течение всего сезона, например, с помощью орошения. Отрицательное воздействие может иметь летняя засуха. Однако не исключено, что в будущем удобрения с полимерным покрытием могут быть использованы в осенний период для внесения мочевины на лугопастбищных угодьях, с тем чтобы ускорить рост весной, в частности в целях раннего выпаса скота.

359. Стоят этих удобрения дороже, чем обычные удобрения, однако расходы могут быть в некоторой степени компенсированы за счет экономии на трудозатратах благодаря сокращению частоты внесения удобрений, а также за счет возможного снижения нормы внесения благодаря повышению эффективности использования азота.

Таблица V.15

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 15**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	2	2	2	2	1
Степень воздействия	~↓	~↓	~↓	~↓	~↓	~↓

*Примечание:* базовым методом для данной меры является поверхностное внесение азотсодержащего удобрения без дополнительной возможности контролируемого действия (например, крупнозернистая мочевина или нитрат аммония и т. д.).

**Полевая мера 16: Фертигация**

360. В районах, подверженных засухе, или с низкой доступностью воды в почве в течение всего или части вегетационного периода, эффективность использования воды и азота следует регулировать в тандеме. Капельное орошение в сочетании с раздельным внесением растворенного в оросительной воде азотного удобрения (т. е. капельная фертигация) считается эффективным методом регулирования воды и питательных веществ в процессе выращивания культур. Такая система орошения обеспечивает прецизионную (в плане пространства и времени) доставку как воды, так и питательных веществ растущим растениям, сводя к минимуму потери воды из-за испарения и потери азота через воздух и воду и тем самым значительно повышая эффективность использования азота. Вода, содержащая необходимые растениям питательные вещества в заданных концентрациях, подается по обширной трубопроводной сети, оснащенной специальными капельницами, что обеспечивает капельную подачу раствора с постоянной скоростью к каждому растению, причем практически независимо от расстояния до источника. Эта трубопроводная сеть может быть установлена на поверхности (непостоянная) или под землей (постоянная, как

правило, на глубине 20–40 см). В отличие от орошения дождеванием и других систем поверхностного орошения или фертигации (например, веерное орошение, «рейнджерные» системы), с помощью которых увлажняется весь профиль почвы, питательный раствор доставляется именно туда, где развивается корневая система растений. По сравнению с другими оросительными системами доставка воды осуществляется с гораздо меньшей скоростью (например, 2–20 литров в час на одну капельницу), но с более высокой частотностью (например, каждые 2–3 дня). Как и в любой оросительной системе, при определении надлежащих норм внесения азота следует учитывать концентрацию азота в оросительной воде, которая может быть высокой.

361. Надлежащее регулирование поступления воды при использовании этой оросительной системы и недопущение стока позволяют снизить нитратное выщелачивание. Как правило, снижаются также выбросы закиси азота за счет сглаживания перепадов влажности почвы и концентрации минерального азота. При подземной капельной фертигации верхний слой почвы остается сухим. Это может привести к увеличению выбросов  $\text{NO}_x$  за счет нитрификации при использовании растворов для фертигации на основе аммония или мочевины, однако интенсивность испарения  $\text{NH}_3$  снижается из-за быстрого контакта аммония с коллоидами почвы, если только вода не попадает на мульчу.

362. Капельная фертигация является оптимальным методом для высокоценных многолетних пропашных культур или для высокопроизводительных однолетних культур, таких как кукуруза, хлопок, овощи и т. д., из-за относительно высоких затрат, связанных с установкой и эксплуатацией таких систем (Sanz-Cobena and others, 2017). Новые подземные фертигационные трубопроводы могут использоваться при выращивании однолетних культур, и возможности их применения значительно шире. Фертигация хорошо зарекомендовала себя в садоводческом производстве, в том числе в тепличных системах. Ожидается, что эти системы станут более распространенными на фоне принятия мер по адаптации к изменению климата. Капельная фертигация может также применяться при использовании очищенного и микрофильтрованного дигестата (Mantovi and others, 2020).

Таблица V.16

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 16**

Форма азота						Общие
	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	. <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓	~↑↓ <sup>b</sup>	~↑↓ <sup>b</sup>	↓	~↑↓ <sup>b</sup>	~↓

<sup>a</sup> Базовым методом для данной меры является поверхностное внесение твердого азотсодержащего удобрения (например, крупнозернистая мочевина или нитрат аммония и т. д.). Категории ЕЭК ООН по  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$  указывают на необходимость дополнительной оценки эффективности.

<sup>b</sup> Хотя при фертигации существует некоторый риск увеличения потерь за счет нитрификации/денитрификации, точное размещение и сокращение общего объема поступления азота, как правило, приводят к совокупному сокращению выбросов.

**Полевая мера 17: Прецизионные методы внесения удобрений, включая глубокое внесение**

363. Внесение азота и фосфора непосредственно в почву вблизи корневой зоны культуры может способствовать улучшению усвоения азота и фосфора, снижению потерь азота через воздух и азота и фосфора через воду, а также снижению общих потребностей в азоте и фосфоре по сравнению с такими методами, как разбрасывание по подготовленной для посева почве посевной площадке или последующая «внекорневая подкормка». Такой подход предполагает применение методов инъекторного внесения удобрений, однако аналогичного эффекта можно добиться и

при заделке удобрений непосредственно в почву. Внесение в почву позволяет снизить непосредственное воздействие воздуха и сократить вероятность потерь в результате испарения аммиака (Bittman and others, 2014). Благодаря этому растения также могут более эффективно конкурировать с почвенной микробной средой за внесенное азотное удобрение, поскольку они будут иметь оптимальный временной и пространственный доступ к минеральному азоту. Однако при высоком содержании влаги в почве существует угроза увеличения потерь в результате денитрификации «карманов», обогащенных внесенным азотом (необходимы дополнительные данные, подтверждающие серьезность этой проблемы). Кроме того, это может препятствовать развитию более глубоких корней и тем самым обеспечить снижение способности растений выдерживать засушливые периоды в отсутствие орошения. Для повышения эффективности этой технологии было разработано специализированное оборудование, а также новые удобрения (гранулированные, супергранулы или брикеты мочевины для «глубокой заделки мочевины», жидкости).

364. В регионе ЕЭК ООН, где трудовые затраты на ручную глубокую заделку удобрений, как правило, непомерно высоки, для прецизионного внесения удобрений требуется специальное оборудование. Внесение удобрений часто осуществляется с помощью сеялки, оснащенной дополнительными инжекторными рабочими органами и туковыми банками. При этом возникают сопутствующие капитальные и эксплуатационные издержки, однако достигается экономия времени на внесение удобрений, так как внесение удобрений осуществляется в ходе посевных работ. Этот метод может также ускорить процесс формирования культур, что позволит сэкономить время. Дополнительные расходы могут быть компенсированы за счет экономии на удобрениях и/или за счет привлечения специализированных подрядчиков.

Таблица V.17

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 17**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓↓	~↑↓	~↑↓	~↓	~↑↓	↓

*Примечание:* базовым методом для этой меры является поверхностное внесение азотсодержащего удобрения.

<sup>a</sup> В масштабах хозяйства и ландшафта можно уменьшить эти потери азота, так как повышение эффективности использования азота позволяет уменьшить объем нового вносимого азота. Сокращаются также косвенные выбросы  $N_2O$  и  $NO_x$  в результате осаждения атмосферного аммиака на лесные и другие земли.

**Меры, касающиеся скота на выпасе**

365. Наиболее эффективным способом снижения потерь азота в системах выпаса является эффективное управление травостоем, которое включает оптимизацию плотности поголовья скота на пастбище (необходимый для животных объем потребления) с учетом доступности травостоя (и, при необходимости, ротацию животных по пастбищным участкам), регулирование состава и структуры травостоя, а также рациональное внесение азота и других питательных веществ.

**Полевая мера 18: Продление сезона выпаса**

366. Операции по управлению навозом связаны с выбросами в результате испарения аммиака, которые, как правило, значительно превышают выбросы аммиака, возникающие в результате выделения экскрементов и мочи животными на пастбище. Это в первую очередь объясняется быстрым просачиванием мочи в почву во время выпаса. Там, где позволяют климатические и почвенные условия, продление сезона выпаса позволит уменьшить накопление навоза, который потом необходимо хранить, и повысит долю возвращаемых экскрементов в виде навоза и мочи во время

пастбищного содержания. В результате продление сезона выпаса и сокращение периода содержания животных в помещении позволяет добиться снижения выбросов аммиака.

367. Хотя данная мера позволяет снизить выбросы аммиака, она может повысить риск потерь через выщелачивание и денитрификацию, в частности, из мест концентрации мочи в конце лета/осенью. Такие повышения могут быть сглажены, если в периоды обильных дождей осенью/зимой азот будет эффективно усваиваться травостоем. При выпасе на пастбищах с однолетними культурами снизить концентрацию мочи и навоза в «проблемных» местах помогает вспахивание почвы в весенний период. Следует обратить внимание на то, что концентрация мочи и навоза в таких «проблемных» местах особенно высока там, где собираются коровы, например, в проходах, около поилок, возле солевого камня и на затененных участках. Возникновение таких концентрированных отложений (и связанные с ними потери азота) можно предотвратить, а дисперсию азота можно повысить путем организации выпаса животных в пределах небольших огороженных участков, имеющих источник питьевой воды, с частым перемещением животных между участками (интенсивное управление пастбищами). Продление сезона выпаса до весны или осени, и даже до зимы, возможно в менее интенсивных системах животноводства, включая более низкую плотность поголовья скота, соответствующую наличию травы, и системах с меньшим объемом входных ресурсов и объемом производства. Считается, что зимний выпас может увеличить риск выбросов  $N_2O$  и  $N_2$  и выщелачивания  $NO_3$  (например, когда в местах обильного попадания мочи в почву создается местный избыток азота при ограниченном поглощении растениями вне вегетационного периода), хотя для подтверждения этого требуются дополнительные данные, а также данные о путях минимизации возможных негативных последствий.

368. Эта мера, как правило, является экономически выгодной, поскольку снижаются затраты на уборку, хранение и использование навоза. Было высказано предположение, что может возрасти потребность в азотных удобрениях (по сравнению с эффективно управляемой системой сбора навоза и его размещения, хранения и разбрасывания с низким уровнем выбросов), поскольку питательные вещества, выделяемые животными непосредственно на пастбище, могут использоваться не так эффективно; однако, это пока не доказано.

369. Эта мера в основном применима к крупному рогатому скоту (овцы, как правило, не содержатся в стойле, или содержатся в течение очень короткого времени) и к экстенсивным производственным системам. Она более эффективна для местных пород, которые соответствуют местным условиям. Как правило, эта мера не подходит для свиноводства, за исключением агролесопастбищных систем; например, в случае местной породы черных свиней в традиционном средиземноморском хозяйстве во время позднего этапа нагула, как это практикуется в Испании и Португалии (Rodríguez-Estévez and others, 2009). Увеличение продолжительности выпасного периода следует также рассматривать с учетом более общих диетических соображений (глава IV, Кормление животных — мера 1).

Таблица V.18

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 18**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	1 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
Степень воздействия	↓↓	~↑	~↑	~↑	~↑	~↓

<sup>a</sup> Базовым методом для этой меры является традиционный пастбищный сезон определенного региона в конце двадцатого века. В Северо-Западной Европе стандартным для крупного рогатого скота будет полугодовой (182,5 дня) выпас в год, 365 дней выпаса в случае овец и ноль дней на открытом воздухе в случае свиней и домашней птицы, хотя возможны местные различия.

### Полевая мера 19: Предупреждение выпаса в районах с высоким уровнем риска

370. К районам с высоким уровнем риска потерь азота из-за выпаса животных относятся районы с высокой степенью доступа к уязвимым поверхностным водам и/или грунтовым водам, где существует риск прямого переноса азота из экскрементов в результате стока или выщелачивания. Кроме того, к ним относятся районы с высоким уровнем риска подтопления, вытаптывания и уплотнения почвы, что значительно повышает вероятность потерь азота, фосфора и патогенных микроорганизмов из навоза и мочи в результате стока и денитрификации. Такие территории должны быть огорожены или тщательно контролироваться, чтобы исключить выпас скота.

371. Близость выпасных животных к водоносным горизонтам ведет к ухудшению качества воды за счет азота и других элементов, а также к биологическому загрязнению. Для снижения этих рисков необходимо соблюдать безопасные расстояния. Вода из загрязненных водоносных горизонтов может угрожать безопасности орошаемых культур, особенно садовых культур, таких как салатная зелень.

Таблица V.19

#### Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 19

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>				
Степень воздействия	~	↓	↓	↓↓	↓	↓

<sup>a</sup> Базовым методом для данной меры является выпас скота на всей доступной площади пастбищ, вплоть до краев полей, независимо от наличия факторов высокого риска.

### Полевая мера 20: Ингибиторы нитрификации — добавки для обработки участков концентрации мочи

372. Ингибиторы нитрификации, которые обычно применяют с минеральными удобрениями, могут также применяться для снижения скорости выщелачивания и денитрификации в местах выделения мочи животными на пастбищных угодьях, в результате чего, согласно имеющимся данным, можно добиться снижения потерь примерно на 50 %. Риск увеличения выбросов аммиака в местах выделения мочи, связанный с возможным замедлением нитрификации, скорее всего, будет минимальным из-за быстрой инфильтрации мочи в почву.

373. На сегодняшний день пока не разработаны рентабельные механизмы доставки ингибиторов нитрификации на пастбища, поэтому эта мера включена в категорию 2 ЕЭК ООН. Многократное поверхностное внесение растворов ингибиторов после выпаса является дорогостоящим и времязатратным. В настоящее время разрабатываются роботизированные системы и дроны для автоматического выявления и точного внесения ингибиторов непосредственно на участки с высокой концентрацией мочи. Доставка ингибиторов через пастбищное животное требует гарантий отсутствия остаточного воздействия на молоко (например, Welten and others, 2016) или мясные продукты, а также воздействия на здоровье и благополучие животных.

Таблица V.20

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям ЕЭК ООН с точки зрения эффективности/практической возможности осуществления и степени воздействия полевой меры 20**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N^2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>				
Степень воздействия	~(↑)	↓↓	↓↓	↓	↓↓	↓

<sup>a</sup> Базовым методом для этой меры является выпас без использования ингибиторов нитрификации.

**Меры в области растениеводства**

374. Меры в области растениеводства можно использовать для повышения эффективности использования азота и снижения потерь в масштабах пастбища и хозяйства, так как они влияют на использование неорганических удобрений и органического навоза на сельскохозяйственных угодьях. Соответствующие меры включают выращивание промежуточных культур и использование бобовых в севообороте (ландшафтные меры 2 и 3, глава VI).

**Г. Приоритеты для директивных органов**

375. Для директивных органов основная цель осуществления мер по сокращению выбросов/смягчению последствий заключается в уменьшении и предупреждении загрязнения различными формами реактивного азота наиболее эффективным с точки зрения затрат образом на местном, региональном и/или национальном уровнях. В отношении органических и неорганических удобрений пятью основными соображениями для директивных органов в отношении комплексного устойчивого управления азотом для сведения к минимуму загрязнения являются:

- а) комплексное азотное планирование на уровне поля, хозяйства, сектора и региона (включая решение проблемы, связанной с тенденцией к концентрации интенсивных животноводческих и растениеводческих хозяйств, часто вблизи городов), способствующее повышению эффективности использования азота, сокращению потерь азотных ресурсов и созданию более чистой окружающей среды с более низким уровнем азотного загрязнения;
- б) сведение к минимуму внесения питательных веществ в зонах с высоким уровнем риска (чувствительные к воде и осаждению азота среды обитания, подверженные высокому риску водосборные бассейны), с учетом специфических региональных требований, факторов уязвимости и условий;
- в) использование в сельском хозяйстве питательных веществ, полученных за счет переработки органических отходов (это может потребовать регионального планирования и надлежащего контроля качества применяемых материалов);
- г) определение (или поощрение) затратоэффективных мер по сокращению выбросов/смягчению последствий, которыми могут воспользоваться сельхозпроизводители, особенно с учетом более глубокого понимания социально-экономических барьеров, мешающих их применению;
- д) предоставление сельхозпроизводителям, по мере необходимости, технических консультаций, рекомендаций и стимулов, касающихся использования и управления азотом.

## **Г. Приоритеты для специалистов-практиков**

376. Для сельхозпроизводителей основной целью внедрения мер по сокращению выбросов/смягчению последствий является повышение эффективности использования вносимого азота в форме удобрения или навоза с точки зрения выращивания культур в их хозяйстве. Таким образом, можно сказать, что сельхозпроизводители смогут повысить эффективность использования азота из органических и неорганических удобрений с помощью следующих пяти основных мер:

- a) комплексного планирования управления азотом в масштабах хозяйства с учетом всех доступных источников азота;
- b) прецизионного управления питательными веществами: надлежащие норма, время и место внесения азота в соответствии с местными условиями;
- c) использования надлежащего источника азота (включая удобрения с ингибиторами и удобрения с контролируемой скоростью действия; бобовые и другие средства биологической фиксации азота) в соответствующем контексте;
- d) использования технологий разбрызгивания навозной жижи с низким уровнем выбросов (с учетом экономии азота за счет планов, касающихся питательных веществ);
- e) быстрой заделки в почву органических добавок, богатых аммиаком.

## **Н. Выводы и вопросы для дальнейших исследований**

377. Наиболее важной мерой по минимизации загрязнения азотом при внесении неорганических азотных удобрений и органического навоза на сельскохозяйственные угодья является наличие комплексного плана управления азотом в масштабах хозяйства, обеспечивающего сбалансированное внесение удобрений для удовлетворения потребностей сельскохозяйственных культур (см. Принцип 7, глава III). Для доставки питательных веществ, когда это технически и экологически осуществимо, следует отдавать предпочтение использованию органического навоза и других восполняемых ресурсов питательных веществ, а оставшиеся потребности удовлетворять за счет закупаемых неорганических удобрений.

378. Определены и описаны меры, которые могут свести к минимуму различные формы потерь азота из удобрений и навоза, вносимых в почву, и которые следует осуществлять надлежащим образом, в соответствии с местными и региональными приоритетами и соображениями затратоэффективности, в том числе с учетом экологических издержек.

379. Следует признать, что выработка на основе общих руководящих принципов надежных рекомендаций по внесению азота с учетом местной специфики по-прежнему вызывает трудности. Тем не менее, дальнейшая разработка специальных инструментов поддержки принятия решений, включающих информацию о различных питательных веществах и их источниках в контексте конкретных особенностей почвы, методов выращивания культур и климатических условий, особенно в сочетании с более точным прогнозированием погоды, будет и далее способствовать совершенствованию рекомендаций для сельхозпроизводителями в целях снижения потерь азота. Прогрессу в этой области будет также способствовать углубление знаний о специфических потребностях сельскохозяйственных культур и минерализации азота в почве и способность предсказывать эти параметры с помощью дистанционного зондирования.

380. Внедрение мер также является серьезным вызовом, поскольку многие экономические и социальные барьеры на пути внедрения не всегда достаточно изучены. Для разработки стратегий, основанных на поощрении и доверии, стимулах и/или положениях законодательства в качестве средств обеспечения внедрения мер, требуется точная количественная оценка затрат и выгод (и влияющих на них факторов), а также понимание практических аспектов, возможных эффектов синергии

и компромиссов. Решающее значение для успешного осуществления планов имеет участие сельхозпроизводителей во всех этапах технологической работы.

381. Наконец, хотя ряд мер в категории 1 ЕЭК ООН уже могут применяться, имеются также меры в категории 2, для перевода которых в категорию 1 требуется проведение дальнейших исследований и анализа в целях более полного понимания ограничений, компромиссов и барьеров на пути применения (или вопросов, связанных с конкретными обстоятельствами). Прогресс в этой области позволит расширить спектр возможностей сельхозпроизводителей и директивных органов.

## **I. Руководящие документы**

382. В конце главы VII приводятся источники, содержащие дополнительные рекомендации.

## J. Справочная литература

- Abalos, D., Jeffrey, S., Sanz-Cobena, A., Guardia, G., Vallejo, A. 2014. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agriculture Ecosystems and Environment* 189, 136–144.
- Akiyama, H., Yan, X., Yagi, K. 2010. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N<sub>2</sub>O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. *Global Change Biology* 16, 1837–1846.
- Beudert, B., Döhler, H., Aldag, R. 1988. Ammoniakverluste aus mit Wasser verdünnter Rindergülle im Modellversuch. *Schriftenreihe* 28, VDLUFA, Kongreßband Teil II.
- Billen, G., Garnier, J., Lassaletta, L. 2013. The nitrogen cascade from agricultural soils to the sea: modelling nitrogen transfers at regional watershed and global scales. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368 (1621), 20130123.
- Bittman, S. and others, eds. (2014). *Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen* (Edinburgh, Centre of Ecology and Hydrology).
- Bittman, S., Liu, A., Hunt, D.E., Forge, T.A., Kowalenko, C.G., Chantigny, M.H., Buckley, K. 2012. Precision placement of separated dairy sludge improves early phosphorus nutrition and growth in corn (*Zea mays* L.). *Journal of Environmental Quality* 41, 582–591.
- Bouwman, A.F., Beusen, A.H.W., Griffioen, J., Van Groenigen, J.W., Hefting, M.M., Oenema, O., Van Puijenbroek, P.J.T.M., Seitzinger, S., Slomp, C.P., Stehfest, E. 2013. Global trends and uncertainties in terrestrial denitrification and N<sub>2</sub>O emissions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368 (1621), 20130112.
- Bruulsema, T. 2018. Managing nutrients to mitigate soil pollution. *Environmental Pollution* 243, 1602–1605.
- Dalgaard, T., Hansen, B., Hasler, B., Hertel, O., Hutchings, N.J., Jacobsen, B.H., Jensen, L.S., Kronvang, B., Olesen, J.E., Schjorring, J.K., Kristensen, I.S., Graversgaard, M., Termansen, M., Vejre, H. 2014. Policies for agricultural nitrogen management—trends, challenges and prospects for improved efficiency in Denmark. *Environmental Research Letters* 9 (11), 115002.
- De Vries, W., Schulte-Uebbing, L. 2019. Required changes in nitrogen inputs and nitrogen use efficiencies to reconcile agricultural productivity with water and air quality objectives by the EU-27. *Proceedings of the International Fertilizer Society* 842. Cambridge.
- Goss, M.J., Tubeileh, A., Goorahoo, D. 2013. A review of the use of organic amendments and the risk to human health. *Advances in Agronomy* 120, 275–379.
- Hénault, C., Bourennane, H., Ayzac, A., Ratié, C., Saby, N.P.A., Cohan, J.-P., Le Gall, C. 2019. Management of soil pH promotes nitrous oxide reduction and thus mitigates soil emissions of this greenhouse gas. *Scientific Reports* 9, 20182. [Doi.org/10.1038/s41598-019-56694-3](https://doi.org/10.1038/s41598-019-56694-3).
- Kim, D.-G., Saggar, S., Roudier, P. 2012. The effect of nitrification inhibitors on soil ammonia emissions in nitrogen managed soils: a meta-analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 93, 51–64.
- Leip, A., Achermann, B., Billen, G., Bleeker, A., Bouwman, A.F., de Vries, W., Dragosits, U., Döring, U., Fernald, D., Guepel, M., Herolstab, J., Johnnes, P., Le Gall, A.-C., Monni, S., Nevececal, R., Orlandini, L., Prud'Homme, M., Reuter, H.I., Simpson, D., Seufert, G., Spranger, T., Sutton, M.A., van Aardenne, J., Voß, M., Winiwarter, W. 2011. Integrating nitrogen fluxes at the European scale. Chapter 16 in: M.A. Sutton, C.M. Howard, J.W. Erisman, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, H. van Grinsven (Eds.), *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Mantovi, P., Moscatelli, G., Piccinini, S., Bozzetto, S., Rossi, L. 2020. Microfiltered digestate to fertigation: A best practice to improve water and energy efficiency in the context of Biogasdoneright™. In: V. Naddo, M. Balakrishnan, K.-H. Choo (Eds.), *Frontiers in Water-Energy-Nexus — Nature-Based Solutions, Advanced Technologies and Best Practices for*

- Environmental Sustainability, *Advances in Science, Technology and Innovation* (pp. 497–499). Springer Nature, Switzerland.
- Misselbrook, T.H., Nicholson, F.A., Chambers, B.J. 2005. Predicting ammonia losses following the application of livestock manure to land. *Bioresource Technology* 96, 159–168.
- Ni, K., Pacholski, A., Kage, H. 2014. Ammonia volatilization after application of urea to winter wheat over 3 years affected by novel urease and nitrification inhibitors. *Agriculture Ecosystems and Environment* 197, 184–194.
- O’Callaghan, M., Gerard, E.M., Carter, P.E., Lardner, R., Sarathchandra, U., Burch, G., Ghani, A., Bell, N. 2010. Effect of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on microbial communities in a pasture soil amended with bovine urine. *Soil Biology and Biochemistry* 42, 1425–1436.
- Recio, J., Vallejo, A., Le-Noe, J., Garnier, J., Garcia-Marco, S., Alvarez, J.M., Sanz-Cobena, A. 2018. The effect of nitrification inhibitors on NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in highly N fertilized irrigated Mediterranean cropping systems. *Science of the Total Environment* 636, 427–436.
- Rodriguez-Estevez, V., Garcia, A., Pena, F., Gomez, A.G. 2009. Foraging of Iberian fattening pigs grazing natural pasture in the dehesa. *Livestock Science* 120, 135–143.
- Ruzek, L., Ruzkova, M., Becka, D., Vorisek, K., Simka, J. 2014. Effects of conventional and stabilized urea fertilizers on soil biological status. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 45, 2363–2372.
- Sanz-Cobena, A., Abalos, D., Mejjide, A., Sanchez-Martin, L., Vallejo, A. 2016. Soil moisture determines the effectiveness of two urease inhibitors to decrease N<sub>2</sub>O emission. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 21, 1131–1144.
- Sanz-Cobena, A., Lassaletta, L., Estelles, F., Del Prado, A., Guardia, G., Abalos, D., Aguilera, E., Pardo, G., Vallejo, A., Sutton, M.A., Garnier, J., Billen, G. 2014. Yield-scaled mitigation of ammonia emission from N fertilization: the Spanish case. *Environmental Research Letters* 9 (12), 125005.
- Sanz-Cobena, A., Lassaletta, L., Aguilera, E., del Prado, A., Garnier, J., Billen, G., Iglesias, A., Sánchez, B., Guardia, G., Abalos, D., Plaza-Bonilla, D., Puigdieta-Bartolomé, I., Moral, R., Galán, E., Arriaga, H., Merino, P., Infante-Amate, J., Mejjide, A., Pardo, G., Álvaro-Fuentes, J., Gilsanz, C., Báez, D., Doltra, J., González-Ubierna, S., Cayuela, M.L., Méndez, S., Díaz-Pinés, E., Le-Noë, J., Quemada, M., Estellés, F., Calvet, S., van Grinsven, H.J.M., Westhoesk, W., Sanz, M.J., Gimeno, B.S., Vallejo, A., Smith, P. 2017. Strategies for greenhouse gas emissions mitigation in Mediterranean agriculture: A review. *Agriculture Ecosystems and Environment* 238, 5–24.
- Sanz-Cobena, A., Misselbrook, T., Camp, V., Vallejo, A. 2011. Effect of water addition and urease inhibitor NBPT on the abatement of ammonia emission from surface applied urea. *Atmospheric Environment* 45, 1517–1524.
- Sanz-Cobena, A., Misselbrook, T.H., Hernaiz, P., Vallejo, A. 2019. Impact of rainfall to the effectiveness of pig slurry shallow injections method for NH<sub>3</sub> mitigation in a Mediterranean soil. *Atmospheric Environment* 216, 116913. Doi:10.1016/j.atmosenv.2019.116913.
- Selbie, D.R., Buckthought, L.E., Shepherd, M.A. 2015. The challenge of the urine patch for managing nitrogen in grazed pasture systems. *Advances in Agronomy* 129, 229–292.
- Sommer, S.G., Olesen, J.E. 1991. Effects of dry matter content and temperature on ammonia loss from surface-applied cattle slurry. *Journal of Environmental Quality* 20, 679–683.
- Stevens, R. J. and Laughlin, R. J. 2002. Cattle slurry applied before fertilizer nitrate lowers nitrous oxide and dinitrogen emissions. *Soil Science Society of America Journal* 66, 647–652.

Viero, F., Bayer, C., Vieira, R.C.B., Carniel, E. 2015. Management of irrigation and nitrogen fertilizers to reduce ammonia volatilization. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 39, 1737–1743.

Welten, B.G., Ledgard, S.F., Balvert, S.F., Kear, M.J., Dexter, M.M. 2016. Effects of oral administration of dicyandiamide to lactating dairy cows on residues in milk and the efficacy of delivery via a supplementary feed source. *Agriculture Ecosystems and Environment* 217, 111–118.

Yan, M., Pan, G., Lavalley, J.M., Conant, R.T. 2020. Rethinking sources of nitrogen to cereal crops. *Global Change Biology* 26, 191–199.

## VI. Землепользование и управление ландшафтом

### A. Введение и предыстория

383. Во главу угла настоящей главы поставлена задача — как добиться смягчения экологических последствий использования азота (N) и при этом сохранить его вклад в производство сельскохозяйственных культур и в животноводство. Это требует реализации в ландшафтном масштабе мер, которые способствуют удалению биогенного азота ( $N_r$ ) из воды и воздуха, тем самым предотвращая каскадирование азота посредством гидрологических и атмосферных механизмов.

384. В настоящей главе рассматривается ряд методов землепользования и управления ландшафтом, а также то, каким образом они могут способствовать более устойчивому использованию азота в сельскохозяйственном производстве при одновременном смягчении негативного воздействия биогенного азота на окружающую среду. Обобщение ключевых элементов этих методов призвано дать ориентиры для комплексного устойчивого использования азота со всеми сопутствующими выгодами в плане воздействия на воздух, водные ресурсы и климат.

385. В настоящей главе использованы сведения из предыдущих глав руководящего документа, в том числе сведения о мерах, принимаемых в системах животноводства и пахотного земледелия в ландшафтном масштабе. Эти меры включают использование земель, прилегающих к районам сельскохозяйственного производства, что дополняет принципы устойчивого управления азотом преимуществами ландшафтного подхода (глава III).

### B. Зачем делать акцент на землепользовании и управлении ландшафтом?

386. Адаптация методов землепользования и управления ландшафтом необходима для оптимизации использования  $N_r$  и одновременно для смягчения нежелательных последствий загрязнения им воздуха, воды или негативного воздействия на климат. Некоторые из преимуществ управления ландшафтом и соответствующих мер а также методов территориального управления изложены ниже:

а) управление ландшафтом позволяет решать проблемы загрязнения  $N_r$  именно там, где они проявляются, как в пространстве, так и во времени, что помогает достичь желаемого эффекта снижения выбросов азота;

б) ландшафтные меры могут быть экономически выгодными по сравнению с другими видами мер (см. главы IV и V). Их также можно применять вне сельскохозяйственных зон, сохраняя сельскохозяйственное производство и одновременно создавая новые природные и рекреационные ресурсы в виде защитных насаждений, лесов, обширных буферных зон вокруг полей, ручьев или водно-болотных угодий;

в) методы территориального управления могут способствовать развитию экономики замкнутого цикла, обеспечивая оптимальное распределение имеющихся запасов удобрений, совершенствуя применение принципов экономики замкнутого цикла и интегрируя в нее знания о местных ресурсах.

387. Как отмечено во вставке VI.1 и в нижеследующем разделе, стратегические изменения в методах землепользования и управления ландшафтом открывают преимущества благодаря сочетанию экологических и экономических эффектов под влиянием действия физических/химических, биологических и социально-экономических факторов.

Вставка VI.1

**Определение методов управления ландшафтом и землепользования для смягчения проблемы загрязнения азотом**

Ландшафт можно определить как имеющий четкие границы географический район, в котором существуют самые разные виды землепользования и управления, оказывающие в том числе воздействие на цикл азота и связанные с ним выбросы.

Обычно ландшафт рассматривается как совокупность разных видов землепользования на площади от нескольких до нескольких десятков квадратных километров. В основе выделения ландшафтного района могут лежать самые разные критерии, такие как сочетание форм землевладения и землепользования, водораздел или закрепленный законодательно административный район. Идея такого ландшафта проиллюстрирована ниже на рисунке VI.1 ниже.

Главный акцент здесь сделан на управлении сельскохозяйственными (в том числе животноводческими) и лесными угодьями в условиях сельского ландшафта под углом зрения биогенного азота. Городское землепользование и инфраструктура не являются предметом анализа в данной главе, хотя они и имеют значение для других ландшафтов.

Ландшафтные меры иногда принимаются в ситуациях, когда применимые меры, направленные на снижение поступления  $N_f$  в сельскую окружающую среду, уже реализуются, и когда социально-экономические факторы диктуют необходимость сохранения тех или иных видов деятельности, как правило, сельскохозяйственной, которые, однако, являются источниками загрязнения  $N_f$ . Если говорить о загрязнении, под смягчением его последствий в руководящем документе понимается «уменьшение неблагоприятного воздействия» любого соединения биогенного азота, например, аммиака ( $NH_3$ ), загрязняющего атмосферу, нитратов, загрязняющих воду ( $NO_3^-$ ), или закиси азота ( $N_2O$ ), вызывающей парниковый эффект. Под «борьбой с загрязнением» здесь понимается «сокращение выбросов в окружающую среду» таких азотсодержащих соединений и диоксида азота ( $N_2$ ). В целом меры по управлению ландшафтом представляют собой в первую очередь стратегии смягчения последствий загрязнения окружающей среды, а не борьбы с ним. Это означает, что они являются дополнительным инструментом сглаживания конкретных неблагоприятных последствий для окружающей среды, которые, как правило, больше, чем их влияние на снижение общих выбросов в окружающую среду.

### **С. Практические последствия землепользования и управления ландшафтом**

388. В данном разделе активное использование методов управления ландшафтом для уменьшения неблагоприятного воздействия  $N_f$  проиллюстрировано на следующих примерах:

- а) смягчение последствий выбросов  $NH_3$ /борьба с загрязнением  $NH_3$  из животноводческих помещений и резервуаров для навозной жижи путем высадки деревьев с подветренной к источнику загрязнения стороны для адсорбции  $NH_3$  и его вертикального рассеивания;
- б) высадка растительности вокруг охраняемых природных территорий и вдоль водотоков для перехвата  $N_f$  (например, в виде переносимого по воздуху  $NH_3$  или вымывания  $NO_3^-$  в поверхностные воды) до достижения им охраняемых природных территорий, которые часто уязвимы перед загрязнением  $N_f$ ;
- в) стратегическое создание водно-болотных угодий для очистки/обработки воды, загрязненной нитратами и растворенным органическим азотом, из полевых стоков или траншей, путем денитрификации и седиментации до того, как эти вещества достигнут уязвимых поверхностных вод;

d) управления лугопастбищными угодьями и распределением навоза во времени и пространстве для сведения к минимуму выбросов азота в уязвимых районах или в определенное время года (например, в конкретных местах охраны грунтовых вод);

e) адаптация схем внесения азотных удобрений (виды удобрений, ингибиторы нитрификации и уреазы, сроки внесения удобрений) в зависимости от структуры почв, грунта и геологии ландшафта;

f) сокращение норм внесения азотных удобрений, а также изменения в практике управления с целью снижения проникновения нитратов в уязвимые поверхностные и подземные воды в конкретных географических районах с низким потенциалом удержания азота в грунте.

389. Одной из основных проблем при переходе к более географически адресному измерению  $N_r$  в масштабах ландшафта является понимание и документирование результатов. Такой вывод был сделан также в ходе финансируемого Европейским Союзом комплексного исследовательского проекта «NitroEurope», в рамках которого были проведены пилотные исследования по шести специально выбранным европейским ландшафтам<sup>29</sup> (например, Dalgaard and others, 2012); более подробную информацию см. Европейскую оценку по азоту (Cellier and others, 2011; Sutton and others, 2011), в которой отражен опыт реализации ключевых национальных исследовательских проектов во Франции, Дании, Нидерландах, Шотландии (Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии) и других странах с различными климатическими условиями. Опираясь на эти исследования, Селье и соавторы (Cellier and others, 2011) пришли к выводу, что в масштабах полей или сельскохозяйственных предприятий процессы трансформации и переноса азота тщательно изучены и дают довольно четкое представление о том, что происходит с азотом в ограниченных пространственно-временных рамках, несмотря на то, что большинство исследований относится к Северо-Западной Европе.

390. Биогенный азот не может рассматриваться в качестве единого источника нагрузки на окружающую среду вследствие кумулятивных последствий трансформации азота в процессе землепользования и изменения климата. Вымывание  $N_r$  отражает нелинейные взаимодействия: эти процессы являются порогово-зависимыми и связаны с острыми стрессогенными факторами. Рассмотрение этих стрессогенных факторов упрощенно или в отрыве друг от друга может привести к серьезной недооценке будущих рисков, связанных с азотом, в том числе рисков эвтрофикации, подкисления, выбросов парниковых газов и изменения биоразнообразия, а также изменений в функционировании лесных, природных земельных и водных систем.

391. Биогенный азот каскадирует посредством гидрологических и атмосферных механизмов в различных масштабах, от ландшафтного до регионального.  $N_r$  может передаваться различными путями в значительных объемах из источников в принимающие экосистемы (см. рис. VI.1 ниже). Например, газообразный аммиак из животноводческих ферм или с полей может осаждаться на листьях близлежащих экосистем в количествах, которые тем больше, чем ближе источник к экосистеме-реципиенту по горизонтали и к поверхности почвы по вертикали (Fowler and others, 1998; Loubet and others, 2006). Аналогичным образом, водно-болотные угодья или сельскохозяйственные/пастбищные угодья, расположенные у подножья склонов, могут перехватывать в грунтовых водах  $NO_3^-$ , источником которых является азот, применяемый выше по склону, при горизонтальном переносе с водными потоками в ландшафтных масштабах (Casal and others, 2019). В обоих случаях это может привести к большому поступлению  $N_r$  в экосистему-реципиент, что может потенциально сказаться на ее функционировании (Pitcairn and others, 2003). Это повышает риск увеличения выбросов  $N_2O$  и  $NO_x$  Beaujouan and others, 2001; Skiba and others, 2006; Pilegaard and others, 2006), что свидетельствует о необходимости комплексного управления использованием азота и оценки его использования в масштабах,

<sup>29</sup> <https://www.peer.eu/projects/peer-flagship-projects/nitroeuropa/>.

выходящих за рамки отдельных полей (Quemada and others, 2020). Без иммобилизации  $N_f$  в биомассе или его удаления путем денитрификации горизонтальные выпадения  $N_f$  на всем протяжении азотного каскада будут продолжаться (Galloway and others, 2003; Billen and others, 2013) (см. рис. VI.1 ниже).

392. Такие выбросы  $N_f$  в результате его переноса из источника в экосистему-рецептор часто называют «косвенными выбросами», причем на них приходится значительная часть общих выбросов  $N_2O$  и  $NO_x$  в почву, хотя по поводу объемов этих выбросов по-прежнему ведутся споры (Mosier and others, 1998; Liu and Greaver, 2009, Tian and others, 2019). Учет невозделанных или маргинальных районов, которые находятся вне или на периферии сельскохозяйственных систем, имеет важное значение для понимания потоков и балансов энергии и веществ, включая азот, что подчеркивает необходимость принятия на вооружение ландшафтного подхода.

393. Животноводство является основным источником загрязнения  $N_f$ , особенно в регионах с высокой плотностью домашнего скота (Leip and others, 2015)), однако услуги, предоставляемые этим сектором, создающим, в том числе, среду обитания и являющимся частью культурного и природного наследия, могут иметь большую ценность для общества (Dumont and others, 2017). Некоторые страны, где интенсивное животноводство соседствует с чувствительными экосистемами, уже приняли ряд мер для снижения выбросов  $N_f$  (например, Нидерланды и Дания), однако они все еще испытывают трудности с выполнением требований законодательства Европейского союза, в частности Рамочной водной директивы, Директивы о средах обитания и Национальной директивы о предельных значениях выбросов. Поскольку наиболее эффективные с точки зрения затрат меры по снижению потерь  $N_f$  в источниках уже реализованы, растет интерес к мероприятиям на ландшафтном уровне (Dalgaard and others, 2012, 2016; Jacobsen and Hansen, 2016).

## **D. Основные проблемы с сокращением выбросов биогенного азота через землепользование и управление ландшафтом**

### **Потоки азота в сельском ландшафте**

394. Рис. VI.1 дает представление о потоках, поглотителях и источниках  $N_f$  в сельских ландшафтах, а также о каскаде реакций на поступление  $N_f$  в виде удобрений и кормов через систему растениеводства и животноводства, а также в природные экосистемы. Соответствующее описание предложили также Sutton and others (2011) в рамках Европейской оценки по азоту. Меры, принимаемые на уровне ландшафта, примеры которых приведены выше, в первую очередь направлены на регулирование потоков поступления  $N_f$  в естественные/полуестественные экосистемы и из этих экосистем, а также с ферм и с полей в водные экосистемы. Эти потоки можно разделить на потоки, относящиеся к загрязнению воздуха, включая выбросы парниковых газов (ПГ) (см. рис. VI.3 ниже); загрязнению поверхностных и грунтовых вод (см. рис. VI.2 ниже); а также к источникам и поглотителям азота (см. рис. VI.1 ниже). Более подробно каждый из этих потоков рассматривается в нижеследующих разделах.

### **Руководящие принципы**

395. В сельской местности имеется целый ряд заинтересованных сторон, имеющих отношение к смягчению последствий загрязнения  $N_f$  или борьбе с таким загрязнением с использованием ландшафтных мер (например, фермеры и другие землепользователи, природоохранные органы, региональные власти, другие предприятия, организации гражданского общества и граждане). Их участие может помочь понять, какие барьеры мешают эффективному осуществлению мер, как можно преодолеть эти барьеры и каким образом следует способствовать формированию консенсуса, который придаст этим мерам политическую и социальную легитимность. По мнению Andersen and others, (2019), руководство по землепользованию и управлению ландшафтом для смягчения последствий азотного загрязнения может включать два этапа:

а) **Этап 1: описание текущей ситуации** (например, нынешний характер землепользования, почвенные и геологические свойства, водные потоки) для понимания каскада азота в ландшафте, систематизации практики управления использованием азота, а также определения соответствующих заинтересованных сторон и их целей по снижению загрязнения  $N_r$ . Этому может способствовать организация семинаров на местах (с участием агрономов, политиков, местных заинтересованных сторон и других заинтересованных групп) с целью определения оптимальных подходов и мер для снижения азотной нагрузки на ландшафт. Важно также собирать в масштабе ландшафта соответствующие данные, которые могут иметь отношение к публичным политическим целям по уменьшению азотной нагрузки в районе. Таким образом, каждый субъект, принимающий участие в формировании ландшафта, может получить представление о возможностях для действий как в рамках системы земледелия, так и в контексте ландшафта в целом;

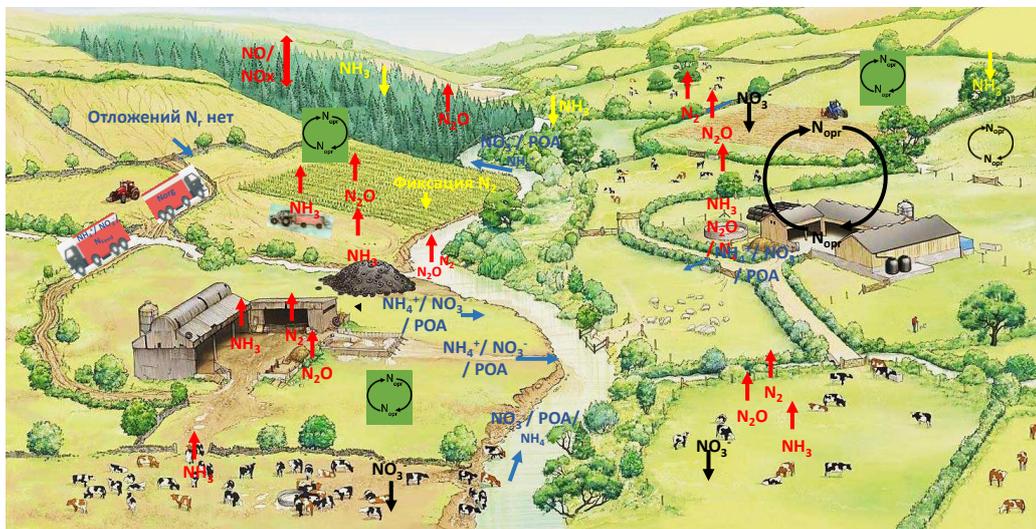
б) **Этап 2: выбор и определение приоритетности использования различных методов землепользования и управления ландшафтом для достижения целей сокращения загрязнения.** На выбор мер в первую очередь влияют геофизические ограничения, которые довольно трудно преодолеть. Однако необходимо учитывать и другие экологические и социально-экономические цели заинтересованных сторон/субъектов.

396. При таком подходе каждой заинтересованной стороне/субъекту, участвующему в формировании ландшафта, может быть предоставлен перечень мер в качестве основы для обсуждения и принятия решений, а также информация о потенциальном экологическом и экономическом эффекте от их применения на уровне хозяйства и ландшафта. Гипотетическим примером может служить многостороннее обсуждение вопроса о создании небольшого заболоченного участка вдоль ручья, проходящего через ферму. Болота способствует удалению  $N_r$  из источников, находящихся выше по течению, путем поглощения растительной биомассой и денитрификации до  $N_2$ , насколько это возможно, избегая выбросов  $N_2O$  (Vymazal, 2017; Audet and others, 2020). Такое улавливание загрязнителей, источники которых расположены вверх по течению, может охватывать как поля в отдельном хозяйстве, так и поля в других хозяйствах. Кроме того, водно-болотные угодья предоставляют дополнительные экосистемные услуги, например, в форме увеличения биоразнообразия, защиты от наводнений и возможностей досуга, например, рыбной ловли. Ключевые риски в этом примере включают возможность увеличения выбросов  $N_2O$  за счет денитрификации и потерю ресурсов  $N_r$  в сельскохозяйственной системе.

397. Интеграция ключевых заинтересованных сторон на обоих этапах процесса важна для продвижения в разработке таких ландшафтных мер, методов управления и использования, которые сводили бы к минимуму каскадирование  $N_r$  и его потери, сохраняя при этом производительность ландшафта. Этот процесс, как правило, требует итеративного повторения вышеупомянутых двух этапов, с тем чтобы оценить последствия различных сценариев. Это также даст участникам время на размышление и консультации с другими членами их заинтересованных групп.

Рис. VI.1

Упрощенный взгляд на ландшафтные потоки  $N_r$ , отражающий функции источников и поглотителей таких элементов ландшафта, как сельскохозяйственные постройки, поля, леса, пастбища и т. д. для различных форм  $N_r$



Источник: этот рисунок является видоизмененной версией рисунка с сайта <http://www.westcountryrivers.co.uk/good-farm-bad-farm/>, использованного в соответствии с условиями лицензии Creative Common License <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Примечание: основные поглотители и источники азота указаны как газообразные потоки  $N_r$  (красным цветом выделены источники, желтым — поглотители), потоки  $N_r$  в направлении к поверхностным водам и в них (синие стрелки, включая эрозию отложений и поверхностный сток), вымывание нитратов в грунтовые воды (черные стрелки) и изменения в почвенных пулах органического азота (зеленые квадраты с черными стрелками). Фиксация атмосферного азота и осаждение атмосферного аммиака ( $NH_3$ ) показаны желтыми стрелками вместе с ввозом продукции на территорию ландшафта и вывозом с нее (транспорт, подвозящий корма и удобрения, и вывоз навоза, урожая, скота и продуктов животноводства). В воздух попадают в основном потоки аммиака, оксиды азота ( $NO_x$ )<sup>30</sup>, закись азота ( $N_2O$ ) и диазот ( $N_2$ ); в воду попадают нитраты ( $NO_3^-$ ), аммоний ( $NH_4^+$ ) и растворенный органический азот (POA), а в почву — остатки органического азота ( $N_{org}$ ). Наибольшее значение для качества воздуха, экосистем и здоровья человека имеют выбросы аммиака ( $NH_3$ ) (в основном в виде отходов животноводства и химических удобрений) и оксидов азота ( $NO_x$ ) (которые выделяются из сельскохозяйственных почв и насыщенных азотом лесов в основном в виде  $NO$ , вступая в реакцию и образуя  $NO_2$ , в дополнение к выбросам оксидов азота транспортными средствами).

398. Проиллюстрированный ландшафт включает в себя следующие основные компоненты:

- а) сельскохозяйственные предприятия; включая помещения для содержания скота, хранилища навоза и кормов, пастбищные угодья, пахотные и лугопастбищные угодья, удобряемые навозом или минеральными формами азота, постоянные культуры и севообороты с обработкой и без обработки почвы;
- б) леса и смешанные системы в виде полезащитных полос, небольших биотопов с лесными массивами, прудами и т. д., а также земельных угодий, выделенных под сельскохозяйственное использование на более или менее постоянной основе; и
- в) водные экосистемы, такие как пруды, озера, ручьи и водно-болотные массивы. Питание этих систем осуществляется за счет прямого стока, полевого

<sup>30</sup> См. сноску 2.

дренажа или грунтовых вод. (Более подробно водная система изображена на рис. VI.2 ниже.)

399. В зависимости от характеристик конкретного ландшафта и наиболее насущных вопросов, требующих внимания, для решения проблемы загрязнения  $N_r$  воды, воздуха и почвы или воздействия на климат может быть выбрана разная последовательность действий. Например, в сухом средиземноморском климате, как, например, в Испании (где часто встречаются респираторные заболевания), внимание по причинам медицинского характера, возможно, следует в первую очередь уделить загрязнению воздуха), в то время как для ландшафта, расположенного во влажном прибрежном климате Дании (где могут быть превышены законодательно установленные обязательные предельные показатели качества воды в уязвимых эстуариях и прибрежных зонах), главным приоритетом может оказаться влияние  $N_r$  на качество воды (Dalgaard and others, 2014).

400. Меры, направленные на достижение одного целевого показателя (например, в отношении воды), также часто влияют на целевые показатели, касающиеся воздуха, почвы и климата. То же самое относится и к мерам, направленным на улучшение качества воздуха и почвы, которые, как правило, прямо или косвенно также влияют на выбросы ПГ. Это означает, что в ситуации, когда приоритет отдается воде, в первую очередь необходимо определить меры по достижению целевых показателей сокращения загрязнения поверхностных и грунтовых вод (главным образом нитратами, но, возможно, и растворенным органическим углеродом). За ними могут последовать меры по достижению целей сокращения загрязнения воздуха (в первую очередь  $NH_3$  и, возможно, также  $NO_x$ ). Наконец, возможно, потребуется определить цели и принять меры по защите почвы (в плане накопления азота и органического углерода I в почве или предотвращения истощения почвы с точки зрения содержания в ней органического углерода и азота), а также по сокращению чистых выбросов ПГ (в данном случае речь идет о чистом балансе потоков  $CO_2$ ,  $N_2O$  и  $CH_4$  в пересчете на эквиваленты  $CO_2$ ). Такой подход требует учета выбросов парниковых газов из почв, а также из других источников, таких как навозохранилища, скот и животноводческие помещения, как в виде азотных (в основном  $N_2O$ ), так и углеродных соединений, связанных с азотным циклом (в основном  $CO_2$ , но, возможно, и  $CH_4$ ; Dalgaard and others, 2015).

## **Е. Интеграция аспектов влияния на воду, почву, воздух и климат**

401. В соответствии с приведенным выше рисунком VI.1 две основные категории азотных загрязнений — это загрязнение через воду (главным образом  $NO_3^-$ , а также другими видами  $N_r$ , включая органические соединения азота) или через воздух (преимущественно  $NH_3$ ,  $N_2O$  и  $NO_x$  и  $N_2$ ). Хотя  $N_2$  не является загрязняющим веществом, его потеря сопровождается снижением эффективности использования азота в растениеводстве, что требует дополнительного внесения  $N_r$ . Следовательно, выбросы  $N_2$  можно рассматривать как косвенную форму азотного загрязнения. Понимание различных местных условий, в которых происходят подобные виды потерь, имеет важное значение при определении последовательности принятия мер по смягчению воздействия азота на ландшафт в соответствии с вышеупомянутыми руководящими принципами.

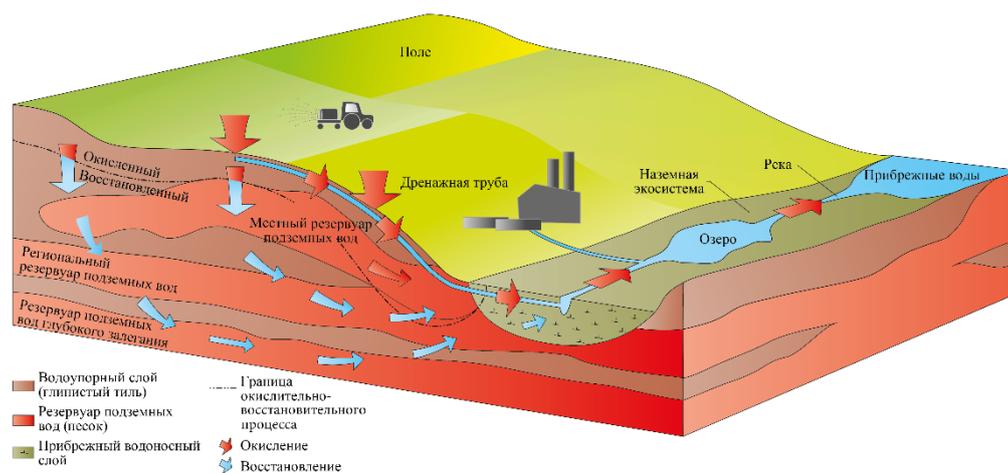
402. В следующих двух разделах представлены основные загрязнители с описанием того, как варианты смягчения последствий загрязнения поверхностных и грунтовых вод связаны с местными почвами, геологией и геоморфологией (первая часть), в то время как варианты смягчения последствий выбросов ПГ тесно связаны с загрязнением воздуха (вторая часть). Интегрируя суммарное воздействие различных вариантов смягчения воздействия  $N_r$  на водные ресурсы, почву, воздух и климат важно оценивать все представленные на территории ландшафта источники/поглотители, поскольку потенциальные варианты смягчения воздействия зависят от степени неоднородности ландшафта и масштабов, в которых реализуются такие варианты. Об этом пойдет речь в третьем разделе.

## 1. Загрязнение поверхностных и грунтовых вод, почвы и геология

403. На карте содержания азота в воде могут быть отражены уровни концентрации  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  и РОА в поверхностных (ручьи, озера и прибрежные воды) и грунтовых водах, причем уровни концентрации тесно связаны с внесением, потоками и выводом  $\text{N}_r$  в данном ландшафте (см. рис. VI.2). На основе такой оценки можно установить конкретные целевые показатели качества грунтовых и поверхностных вод для того или иного ландшафта. В Европейском Союзе качество воды должно отвечать соответствующим стандартам, установленным исходя из целей и задач Рамочной водной директивы, Директивы по нитратам и Директивы по питьевой воде (хорошее экологическое и химическое состояние, снижение и предотвращение загрязнения воды нитратами сельскохозяйственного происхождения). Например, Директива Европейского союза по подземным водам устанавливает стандарт качества подземных вод на уровне 50 мг нитратов на литр, что соответствует стандарту содержания нитратов в питьевой воде согласно Директиве по питьевой воде<sup>31</sup>. В других частях региона ЕЭК ООН Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) также применяет максимальную норму содержания нитратов в питьевой воды на уровне 50 мг на литр (см. также European Commission, 2019). На основе такой информации и информации о возможных мерах (см. разделы ниже) можно строить сценарии достижения этих целевых показателей в том числе за счет использования методов землепользования и управления ландшафтом (Hashemi and others, 2018a, b).

Рис. VI.2

### Концептуальная модель взаимодействия неглубоко залегающих грунтовых вод с зависимыми водными экосистемами



Источник: на основе Hinsby and others, 2008.

Примечание: пути переноса в водные экосистемы обозначены стрелками. Синими стрелками обозначены обедненные грунтовые воды (ниже зоны окислительно-восстановительного процесса), а красными — потоки воды в верхней зоне окисления.

## 2. Загрязнение воздуха и связанные с ним выбросы парниковых газов

404. На основе современной сельскохозяйственной практики выбросы  $\text{N}_r$  в воздух могут быть измерены и/или оценены с помощью моделей (как показано на рисунке VI.3) и сопоставлены с возможными «критическими нагрузками» при атмосферном осаждении  $\text{N}_r$ . Критическими нагрузками являются предельные уровни осаждения, ниже которых, согласно современным знаниям, отрицательные последствия не наступают. Следует также учитывать роль сельскохозяйственной деятельности в превышении критических нагрузок  $\text{N}_r$  в чувствительных природных районах, расположенных в пределах или поблизости от ландшафта (Dragosits and

<sup>31</sup> Директива 2006/118 Европейского парламента и Совета Европейского союза от 12 декабря 2006 года о защите грунтовых вод от загрязнения и истощения, *Official Journal of the European Union*, L 372 (2006), сс. 19–31.

others, 2006). На основе этого можно определить меры по достижению целевых показателей сокращения выбросов, например, испарения,  $\text{NH}_3$ . Кроме того, такой подход позволяет выявлять региональные «эпицентры» азотного загрязнения (см. рис. VI.3 ниже) и оценивать потенциал сокращения/смягчения последствий выбросов парникового газа  $\text{N}_2\text{O}$  и других ПГ (см. рис. VI.3 ниже).

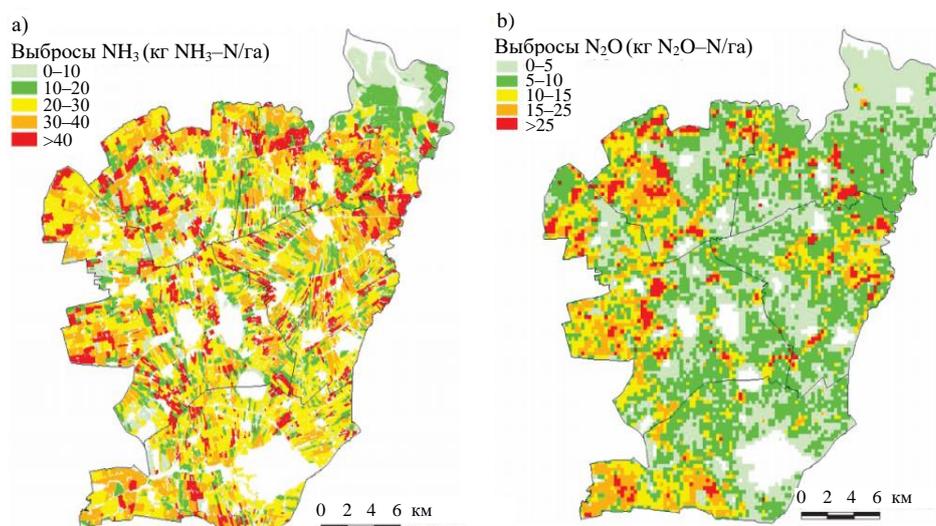
### 3. Поглотители, гетерогенность источников и проблемы масштаба

405. Загрязнение воды, воздуха и парниковых газов в пределах ландшафта зависит как от поглотителей и источников азота, так и от конкретных видов сельскохозяйственных предприятий в пределах ландшафта, поскольку сельскохозяйственные системы являются главным источником азотного загрязнения.

406. На рисунке VI.4 ниже приведен пример источников и поглотителей  $\text{N}_r$  в зависимости от типов хозяйств. На нем видно, что разные типы производственных систем связаны с разными видами выбросов  $\text{N}_r$  в окружающую среду, оцениваемыми на основе модели [www.Farm-N.dk](http://www.Farm-N.dk). Например, вымывание  $\text{NO}_3^-$  является доминирующей формой выброса  $\text{N}_r$  для хозяйств, выращивающих товарные культуры, и в некоторой степени также для производственных систем, использующих зерно в качестве кормов (например, свиноводческие и птицеводческие фермы). Напротив, в абсолютных величинах вымывание на гектар в животноводстве выше, чем в хозяйствах, занимающихся выращиванием товарных культур. В зависимости от интенсивности производства и методов управления системы выращивания крупного рогатого скота (жвачных животных) могут иметь относительно низкие показатели потерь  $\text{N}_r$  при вымывании, хотя такие производственные системы демонстрируют высокие выбросы  $\text{NH}_3$ , что связано с со стойловым содержанием скота, хранением и внесением навоза. В частности, системы интенсивного молочного производства предполагают использование значительных объемов азота с высоким уровнем выбросов  $\text{NH}_3$ . В условиях прохладного морского климата при экстенсивном круглогодичном выпасе крупного рогатого скота уровень выбросов  $\text{NH}_3$  может быть низким (из-за эффективной инфильтрации мочи по сравнению с накоплением навоза в процессе стойлового содержания домашнего скота), хотя существует риск увеличения вымывания  $\text{NO}_3^-$  и роста выбросов  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$ .

Рис. VI.3

**Пример годовых выбросов аммиака при внесении навоза а) и общих выбросов закиси азота из почв б) в сельском ландшафте Нидерландов**



Источник: на основе Cellier and others, 2011.

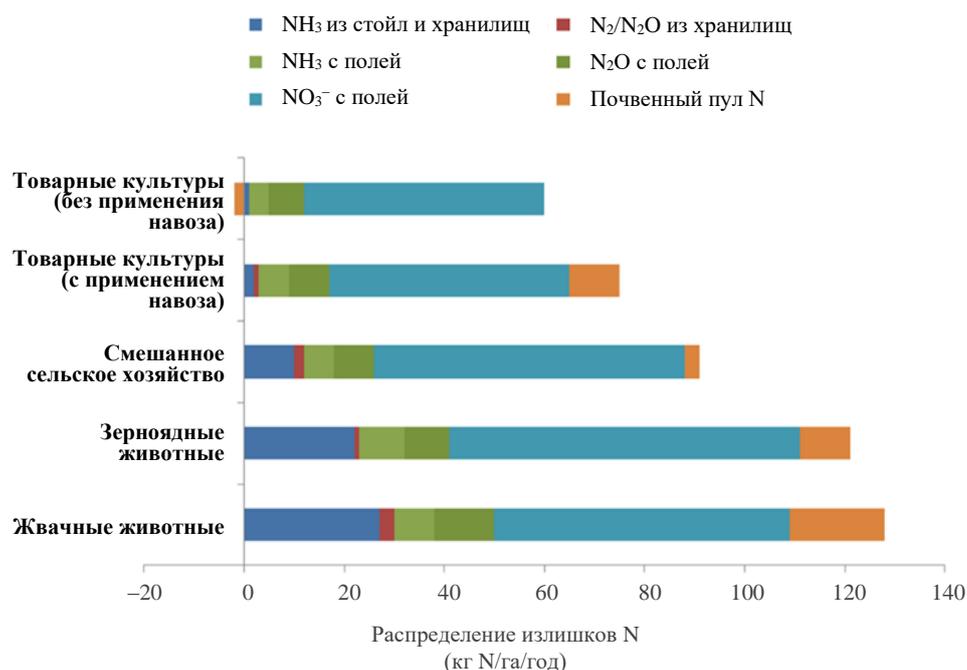
407. Другими последствиями использования навоза являются изменения в запасах азота (а также углерода) в почве в результате внесения навоза на пастбищах и пахотных землях. В исследовании Dalgaard and others (2011) отмечается, что самый

высокий прирост запаса азота в почве характерен для систем разведения жвачных животных (со сравнительно интенсивным использованием луговых угодий и навоза, в том числе соломы в глубокой подстилке и т. д., а также внесением навоза на пастбищах и пахотных землях). Напротив, системы возделывания товарных культур, где не используется навоз, показали чистое сокращение запасов азота (и углерода) в тех случаях, когда они функционировали без внесения навоза.

408. Серьезные различия в механизмах выделения азота в окружающую среду в разных сельскохозяйственных системах и, следовательно, в сельскохозяйственных источниках и поглотителях азота в пределах ландшафта означают, что географическое положение сельскохозяйственного предприятия играет важную роль с точки зрения выбросов  $N_f$  в окружающую среду — в чувствительные водоемы или чувствительные наземные природные территории. На эту связь между источником и поглотителем также влияют различия в геопедоморфологических характеристиках, которые отражаются на темпах вымывания, поверхностного выделения  $N_f$ , горизонтального переноса  $N_f$  в почве и породе (см. рис. VI.2 выше). Следовательно, надлежащее планирование землепользования, землеустройства, размещения сельскохозяйственных предприятий и т. д. оказывает значительное влияние на ландшафтные потоки  $N_f$ , давая возможность снизить связанную с  $N_f$  нагрузку в масштабах ландшафта.

Рис. VI.4

**Сравнительное распределение излишков азота между видами выбросов и пулов  $N_f$  для пяти различных сельскохозяйственных систем в пределах датского ландшафта**



Источник: на основе Dalgaard and others, 2011, оценки с использованием модели <http://www.Farm-N.dk>.

Примечание: потери  $N_2$ ,  $NO_x$  и органического азота из почв в данном исследовании не оценивались. Для хозяйств, выращивающих товарные культуры и не использующих навоз, была проведена оценка чистого объема выбросов азота из азотного пула в почве, в то время как для других систем ведения сельского хозяйства была проведена оценка чистого накопления азота в почве, сокращающая объем выбросов  $N_f$  в отчетный период.

409. Меры, принимаемые на ландшафтном уровне, могут включать: выбор места для (новых) животноводческих объектов вдали от чувствительных экосистем; использование определенных видов землепользования (например, высадка деревьев вокруг животноводческих объектов, создание буферных зон вокруг водоемов, создание водно-болотных массивов, сокращающих  $N_f$ , и т. д.); и использование систем

земледелия различной интенсивности (например, пастбища против севооборота). Изменение норм внесения и распределения навоза и произведенных неорганических удобрений в соответствии с чувствительностью местной окружающей среды в пределах ландшафта (или даже в пределах и за пределами ландшафта) является еще одним вариантом, который может помочь в достижении целевых показателей сокращения выбросов  $N_f$  и смягчения последствий таких выбросов. Таким образом, подобные целевые методы землепользования и землеустройства могут использоваться для содействия достижению целевых показателей сокращения выбросов  $N_f$  в воздух, воду и в виде ПГ.

410. Следует помнить, что наличие  $N_f$  в местном или в ландшафтном масштабе является ценным ресурсом для выращивания сельскохозяйственных культур, производства биомассы и животноводства. Поэтому следует отдавать приоритет рециркуляции всех ресурсов  $N_f$ . Например, биомасса, получаемая с помощью восстановленного из ландшафта  $N_f$ , например, биомасса водно-болотных угодий или деревья, произрастающие в непосредственной близости от животноводческих хозяйств, должна рассматриваться в качестве биоэнергетических ресурсов. Это означает, что важно учитывать не только прямые потери  $N_f$  в форме загрязнения окружающей среды, но и объем  $N_f$ , потерянного в виде  $N_2$ . Это подчеркивает необходимость разработки комплексных методов анализа для количественной оценки всех потоков  $N_f$  в ландшафтных масштабах.

411. Потоки и трансформации  $N_f$  в пределах ландшафта определяются топографией и пространственной изменчивостью биогеохимических и физических характеристик почвы. Это, наряду с климатом и регулированием использования азота в сельском хозяйстве, определяют микробиологический кругооборот азота в почве (с особым акцентом на процессы нитрификации и денитрификации), взаимосвязь процессов, происходящих с азотом в растениях и почве, и таким образом, потоки  $NH_3$ ,  $NO_x$ ,  $N_2O$ ,  $N_2$  в атмосферу и вымывание растворенного органического азота (Salazar and others, 2019) и  $NO_3$  в реки и другие водоемы (см. рис. VI.1 и VI.2 выше). Для оценки таких потоков  $N_f$  в ландшафтном масштабе важно собирать информацию о «деятельности» в масштабе полей/ферм, например об агрономической практике, видах удобрений, нормах внесения азота, типах и топографии почв, а также о подходах к снижению выбросов и смягчению их последствий. Новые технологии, например, беспилотные летательные аппараты, спутники и самолеты, являются ценными инструментами, помогающими собирать соответствующие данные (например, о влажности почвы, рельефе, видах растительности). Примером может служить использование спутниковых карт растительности для оценки потоков  $CH_4$  в ландшафтном масштабе (Dinsmore and others, 2017), которые могут помочь в разработке стратегий смягчения последствий выбросов.

## **Г. Приоритеты для директивных органов**

412. В целом рекомендации для директивных органов<sup>32</sup> следуют вышеупомянутым руководящим принципам, основанным на оценке текущей ситуации (Этап 1: Описание текущей ситуации) в качестве основы для определения подходящих мер землепользования и управления ландшафтом (Этап 2: Выбор и определение приоритетности использования различных методов землепользования и управления ландшафтом для достижения целей сокращения загрязнения). Это может помочь в определении приоритетности мер, направленных на достижение целевых показателей (сокращения) воздействия на водные ресурсы, воздух, почву и климат.

<sup>32</sup> В настоящем разделе под представителями директивных органов понимаются представители всех видов центральных органов (ведущих вопросами сельского хозяйства, экологии, финансов, торговли и здравоохранения), ведущих предприятий в пищевой промышленности и сельском хозяйстве, научных кругов и служб, занимающиеся распространением опыта и знаний, из самых разных регионов мира (например, из регионов ЕЭК ООН, включая Северную Америку, Восточную Европу, Кавказ и Центральную Азию, Европейский союз, более мелкие административные регионы внутри стран, муниципалитеты, водосборные районы и т. д.).

413. В соответствии с руководящими принципами Европейской комиссии (2010 год) при разработке политики осуществления таких мер рекомендуется до начала их практической реализации оценивать их воздействие (оценка *ex ante*), а также включать и учитывать их экономические издержки. Кроме того, по истечении определенного периода осуществления рекомендуется проводить соответствующую оценку их эффективности на практике (оценка *ex post*). Вторая оценка может быть использована для пересмотра политики и принятия итерационно новых дополнительных мер на основе вышеизложенного двухэтапного подхода. Примером такого итерационного цикла политики являются пять сменявших друг друга датских национальных планов действий в области азота в период 1987–2015 годов, которые включали оценку издержек осуществления этих планов действий как *ex ante*, так и *ex post* (Dalgaard and others, 2014).

414. В последние пять лет все больше внимание стало уделяться мерам, связанным с  $N_r$ , которые способствуют построению биоэкономики замкнутого цикла, позволяя компенсировать затраты на принятие мер новыми возможностями получения дохода от восстановления  $N_r$  (например, Dalgaard and others, 2014; Sutton and others, 2019). Речь идет о мерах, которые способствуют более эффективному использованию азота, например об использовании навоза в биогазовых установках, которые, помимо того, что они поставляют биогенный азот растениям, могут также служить центрами более оптимального распределения удобрений, рекуперированных из органического материала (глава IV), в масштабах ландшафта или региона. Можно назвать и другие примеры:

- a) использование  $N_r$  из зеленой биомассы, полученной из урожаев местных богатых белками кормовых культур, на биоперерабатывающих предприятиях;
- b) использование растительных остатков в биогазовых установках, включая рекуперацию  $N_r$ ;
- c) использование культур для получения энергии с рекуперацией  $N_r$ ;
- d) использование смешанного земледелия для повышения общей эффективности использования ландшафтного азота и рекуперации  $N_r$  (Wilkins and others, 2008);
- e) использование агролесоводческих систем для максимальной рекуперации  $N_r$  уже попавшего в элементы ландшафта.

415. Такие варианты могут также привести к формированию производственных систем, более устойчивых к изменению климата с более разнообразным набором предлагаемых услуг и с меньшим «азотным следом». Например, лесные массивы в ландшафтах выполняют многочисленные функции, удерживая ландшафтные воды и препятствуя наводнениям, являясь ареалом дикой флоры и фауны и предоставляя укрытие живности, и их использование в качестве инструмента регулирования  $N_r$  является лишь одной из возможностей (например, Sutton and others, 2004).

416. В этом контексте важно оценивать как баланс  $N_r$ , так и последствия проводимых мероприятий для экономики/благополучия (например, не только экологические, но и экономические последствия для сельскохозяйственных предприятий в сравнении с более широкими социально-экономическими последствиями).

## **G. Меры по смягчению последствий на уровне землепользования и управления ландшафтом**

417. Ниже кратко излагаются оценочные последствия ландшафтных мер, принимаемых в рамках устойчивого управления азотом в разбивке по пяти основным категориям. Ландшафтные меры, перечисленные ниже, представляют собой возможные варианты действий в рамках этапов 1 и 2 (например, описание текущей ситуации и выбор управленческих решений), которые затем могут быть отобраны и приоритизированы в соответствии с местным контекстом:

- a) меры землепользования для смягчения последствий выбросов  $N_f$  в результате выращивания сельскохозяйственных культур и севооборота;
- b) ландшафтные меры для смягчения последствий выбросов  $N_f$  в результате управления использованием прибрежных районов и вод;
- c) облесение, временное выведение земель из севооборота, и создание лесополос для смягчения последствий выбросов  $N_f$ ;
- d) смягчение каскадных последствий выбросов  $N_f$  в местах сосредоточения домашнего скота;
- e) «умное» ведение сельского хозяйства в пределах ландшафта с точки зрения смягчения последствий выбросов  $N_f$ .

418. После описания каждой меры ниже в таблице (см. таблицы VI.1–VI.16 ниже) обобщаются эффективность/практическая возможность осуществления мер по категориям ЕЭК ООН (с использованием подхода, описанного в ECE/EB.AIR/120, Bittman and others, 2014), а также степень воздействия каждой такой меры<sup>33</sup>. Представлены экспертные заключения в отношении испарения аммиака, потерь от денитрификации в виде  $N_2O$ ,  $NO_x$  и  $N_2$ , потерь за счет стока и вымывания в виде  $NO_3^-$ , а также общих потерь азота.

419. В настоящей главе, посвященной мерам на уровне землепользования и управления ландшафтом, основное внимание уделяется смягчению неблагоприятных последствий, хотя эти меры могут дать эффект и в плане сокращения выбросов.

420. Если считается, что мера приводит к увеличению потерь азота в той или иной форме, то она по определению также относится к категории 3 для данной формы азота. Степень воздействия той или иной меры может рассматриваться как показатель ее «эффективности», а не того, в какой степени эта мера «применима» в различных контекстах. Когда необходима более подробная информация, степень воздействия той или иной меры описывается в сравнении с конкретным типовым подходом. Например, в случае искусственных водно-болотных угодий используются два базовых подхода:

- a) бездействие (когда загрязненная вода попадает непосредственно в ручьи и реки); и
- b) использование передовых методов, направленных на рекуперацию питательных веществ.

421. В некоторых частях региона ЕЭК ООН использование отдельных типовых подходов может быть запрещено, например по причине того, что они приводят к неприемлемо высокому уровню загрязнения. В таблице VI.17 ниже представлен обзор всех методов землепользования и управления ландшафтом и ожидаемого эффекта от них с точки зрения вымывания/стока (загрязнение воды), улутучивания  $NH_3$  (загрязнение воздуха) и других газообразных выбросов азота, включая выбросы  $N_2O$  (воздействие на климат), а также общего загрязнения азотом.

### **Меры, конкретно касающиеся выбора культур для возделывания и севооборота**

422. Главным результатом оптимального выбора культур для выращивания и их чередования (севооборот) является улучшение усвоения азота, накапливаемого в корнях, и, соответственно, целенаправленное в географическом плане сокращение вымывания нитратов при незначительных прямых последствиях для других азотсодержащих соединений. В целом этого можно добиться с помощью перечисленных ниже мер:

<sup>33</sup> Описание категорий ЕЭК ООН и подхода к представлению степени воздействия см. в п. 16 главы I.

### Управление ландшафтом — мера 1: Увеличение площадей под многолетними культурами

423. Использование многолетних культур, преимущественно злаковых или злаковоклеверных смесей, в частности на лугопастбищных угодьях, может снизить риск выброса  $N_r$  в окружающую среду в результате иммобилизации азота в растительной биомассе и подстилке. Это также увеличивает запасы азота (и углерода) в почве, причем более высокое содержание органического углерода в почве обеспечивает повышенную способность удержания  $N_r$ . При этом снижается риск вымывания  $N_r$ , хотя существует вероятность увеличения выбросов  $N_2O$  в почву. Однако в большинстве исследований рост выбросов  $N_2O$  был признан незначительным (Li and others, 2005; Abdalla and others, 2019).

Таблица VI.1

#### Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЕЭК ООН и степени воздействия меры 1 в области управления ландшафтом

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3	2	3	1	3	1
Степень воздействия	~	↓↑	? <sup>a</sup>	↓↓	↓↑	↓

<sup>a</sup> Данных для оценки эффекта недостаточно, хотя для  $N_2O$  и  $N_2$  ответы могут быть аналогичны.

### Управление ландшафтом — мера 2: Использование промежуточных культур

424. Использование промежуточных культур (иногда именуется «почвозащитными культурами») после основной культуры помогает снизить вымывание нитратов (Gabriel and others, 2012). Выбор стратегических участков для внесения таких культур в пределах ландшафта может быть направлен на уменьшение смыва нитратов. Нитраты, образующиеся в процессе послеуборочного разложения и минерализации остатков урожая, усваиваются промежуточными культурами в период между основными сельскохозяйственными сезонами. Промежуточные культуры также помогают снизить риск смыва (эрозии) почвы и поверхностных отложений и переноса  $N_r$  в водотоки. В начале нового вегетационного периода промежуточные культуры вносятся в почву при распашке (например, в виде «зеленого удобрения») и становятся источником дополнительных органических и питательных веществ для последующих урожаев, что может быть особенно полезно в условиях интенсивного ведения сельского хозяйства в Средиземноморье (Karyoti and others, 2018). В условиях континентальной России Лукин и соавторы (2014 год) пришли к выводу, что выращивание масличной редьки после внесения твердого навоза или навозной жижи позволяет значительно снизить попадание в подземные воды как аммония и нитратов, так и фосфора и калия.

425. Зимние промежуточные культуры в некоторых случаях используются для снижения концентрации азота в почве в период повышенного риска вымывания нитратов, однако успех их использования в повышении эффективности применения азота на протяжении всего цикла выращивания культур зависит от эффективности управления остатками промежуточных культур и соответствующей корректировки схем внесения удобрений под последующие урожаи. Самое главное, промежуточные культуры должны высаживаться заблаговременно, чтобы они набрали силу до периода повышенного риска.

426. Использование промежуточных культур помогает нарастить запас С и N в почве, но несет риск увеличения выбросов  $NH_3$ ,  $N_2O$  и  $NO_x$  в почву в результате процесса минерализации после внесения в почву промежуточных культур (Sanz-Cobena and others, 2014; Xia and others, 2018; Abdalla and others, 2019). Комплексное использование почвозащитных культур, адаптированное к местным

условиям, может максимально увеличить агроэкологические плюсы при одновременном снижении минусов Tribuillois and others 2016, Quemada and others, 2020). В условиях холодного климата циклы «мороз — оттепель» в зимний период могут приводить к значительному высвобождению питательных веществ и выбросу  $N_2O$  Wagner-Riddle and others, 2017). Для сведения к минимуму потерь N необходимо планировать пропашку почвы, с тем чтобы синхронизировать высвобождение N и его поглощение последующим урожаем. При наличии излишка азота почвозащитные культуры не смогут смягчить потери, не вытесняя привнесенный азот (например, сокращение вносимых количеств азота для компенсации сбереженного азота; Принцип 6).

Таблица VI.2

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЕЭК ООН и степени воздействия меры 2 в области управления ландшафтом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3	2 <sup>a</sup>	2	1	2 <sup>a</sup>	1
Степень воздействия	~	↓↑	↓↑	↓	↓~	↓

<sup>a</sup> Потери при денитрификации отнесены к категории 2, так как они могут быть увеличены за счет почвозащитных культур/остатков. Время проведения этой операции, как правило, приходится на весну после периода осушения, когда нет существенного риска повышенного вымывания. Ожидается, что вымывание будет значительно снижено, так как любой избышек N в конце предыдущего сезона будет поглощен почвозащитными культурами в течение периода риска.

**Управление ландшафтом — мера 3: Включение фиксирующих  $N_2$  культур в севооборот**

427. Включение фиксирующих  $N_2$  культур, например, бобовых культур (фасоль, чечевица и т. д.), в севооборот позволяет снизить нормы внесения азотных удобрений. При таком подходе  $N_2$  преобразуется в  $NH_3$ , который затем перерабатывается в органические азотные соединения бактериями, связанными с корневой системой бобовых. Этот органический  $N_f$  может усваиваться последующими культурами с остатками урожая. Бобовые стимулируют рост содержания C и N в почве и, предположительно, оказывают общее положительное влияние за счет уменьшения вымывания нитратов по сравнению с использованием химических удобрений (Voisin and others, 2014; Jensen and others, 2020). Предполагается, что биологическая фиксация азота действует как «механизм замедленного действия», высвобождая  $N_f$  в соответствии с потребностями растений (см. Drinkwater and others, 1998). Было высказано предположение, что негативное стимулирующее воздействие на выбросы  $N_2O$  возможно, но маловероятно (Abdalla and others, 2019). Напротив, как и в случае с ландшафтной мерой 3, присутствие бобовых в почве ускоряет процесс минерализации. Хотя это может помочь удовлетворить потребности в азоте культур, которые будут выращиваться в будущем, такое ускорение минерализации чревато риском увеличения выбросов  $N_f$  в виде  $NO_3^-$  и  $N_2$ , а также  $N_2O$ ,  $NO_x$  и  $NH_3$ . Для количественной оценки этих плюсов и минусов, в том числе в многосезонном и ландшафтном масштабах, требуются дополнительные экспериментальные данные.

428. Клевер является важной составляющей травяного покрова многих лугопастбищных угодий по всей Европе, однако совершенно непонятно, какое количество азота продуцируется за счет пастбищ. В течение вегетационного периода азот, фиксируемый бобовыми, в основном используется этими же культурами (бобовыми или совместными культурами). Однако, когда активный рост замедляется или прекращается, зафиксированный азот может высвобождаться в почву в процессе минерализации с потенциальными потерями азота в результате вымывания и денитрификации, в частности, если пастбище вспахивается или его растительность уничтожается химикатами (или и то, и другое) в рамках системы севооборота.

Хотя использование бобовых снижает потребности во внесении азота (в виде удобрений или навоза) и потери азота, связанные с такими операциями по его внесению, потери в результате вымывания в периоды парования вслед за выращиванием бобовых могут оказаться больше, если в севооборот не включаются почвосберегающие культуры (см. главу V). Совмещение культур дает возможность сделать доступными медленно высвобождающиеся запасы азота из бобовых культур для совмещенных небобовых культур, что может снизить потери азота.

Таблица VI.3

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЕЭК ООН и степени воздействия меры 3 в области управления ландшафтом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	2	2 (3)	3 (3)	2 (3)	3 (3)	2 (3)
Степень воздействия	~↓	↓ (↑) <sup>a</sup>	↓ (↑) <sup>a</sup>	↓ (↑) <sup>a</sup>	~?	↓ (?) <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Стрелки показывают общее ожидаемое сокращение потерь азота по сравнению с использованием минеральных удобрений при том понимании, что послеуборочные потери азота, связанные с использованием бобовых культур в почве для увеличения почвенных запасов C и N, могут также привести к увеличению выброса азота и потерям в результате вымывания (показаны в скобках).

**Управление ландшафтом — мера 4: Внедрение агролесоводства и использование деревьев в ландшафте**

429. Агролесоводство включает в себя выращивание сельскохозяйственных культур и деревьев с чередованием рядов деревьев и однолетних культур, или куп деревьев в ландшафте. Такой подход дает возможность включать в ландшафт неудобряемые культуры, например, порослевый лес с коротким оборотом рубки для производства биоэнергии. Это может способствовать увеличению биоразнообразия, удалению излишков  $N_f$  с соседних пахотных полей, минимизации эрозии, обеспечению ветрозащиты и увеличению отложения  $NH_3$  в результате повышения неровности поверхности (Sutton and others, 2004; Lawson and others, 2020). Все эти эффекты сглаживают перенос  $N_f$  в пространственных масштабах и загрязнение воздуха и воды  $N_f$  (Pavlidis and Tsihrintzis, 2018). Этот подход также можно сравнить с ландшафтными мерами 10 и 12.

Таблица VI.4

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЕЭК ООН и степени воздействия меры 4 в области управления ландшафтом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	3	3	1	3	1
Степень воздействия	↓	~↑ <sup>a</sup>	~↑ <sup>a</sup>	↓↑ <sup>a</sup>	~?	↓

<sup>a</sup> Эффект будет зависеть от конфигурации источников и поглотителей  $N_f$  в ландшафте. Агролесоводство для увеличения азотных поглотителей между сельскохозяйственной территорией и водотоком является эффективным средством для снижения потерь  $NO_3^-$ . И наоборот, поглощение деревьями азота, выделяемого в виде  $NH_3$  животноводческими фермами, может привести к увеличению почвенных потерь  $N_2$ ,  $NO_x$  и  $NO_3^-$ , если только использование быстрорастущих деревьев не обеспечит улавливания всего избыточного  $N_f$  деревьями.

## 2. Меры по управлению прибрежными районами и водами

430. Основным эффектом этой меры является снижение концентрации нитратов и отрицательного воздействия загрязненной азотом воды, которая просачивается из сельскохозяйственных систем, например, через керамические дренажные системы, с поверхностными или горизонтальными потоками воды. Полевые меры по сокращению потерь в источнике рассматриваются в главе V.

### Управление ландшафтом — мера 5: Искусственные водно-болотные угодья для стимулирования удаления $N_r$

431. Искусственным водно-болотным массивам уделяется все больше внимания в связи с их высокой применимостью для удаления биогенных веществ из водоемов или для очистки сточных вод в различных климатических условиях, в том числе от навоза животных и других загрязнителей (Poach and others, 2003; Muñoz and others, 2016; Caballero-Lajarin and others, 2015; Wu and others, 2016; Vymazal, 2017; De La Mora-Orozco and others, 2018; Luo and others, 2018; Terrero and others, 2020). Схемы таких искусственных водно-болотных массивов могут сильно различаться, и темпы удаления биогенных веществ зависят от используемых видов растений, времени удержания воды, температуры, типа искусственных водно-болотных массивов и т. д. (Sutar и др., 2018). Принцип функционирования искусственных водно-болотных массивов заключается в создании анаэробных условий, способствующих денитрификации до  $N_2$  и накоплению других биогенных веществ. Это означает, что использование искусственных водно-болотных массивов для удаления  $N_r$  чревато увеличением выбросов  $N_2O$ , а также  $CH_4$ , хотя для количественной оценки всех плюсов и минусов при различных условиях использования необходимы дополнительные данные (Garnier and others, 2014). Поскольку основное внимание уделяется денитрификации, это означает, что данный подход снижает общую эффективность использования азота на уровне ландшафта, предотвращая рекуперацию ресурсов  $N_r$ . Популярность данного варианта управления качеством поверхностных вод связана с его относительной дешевизной по сравнению с более сложными технологиями.

Таблица VI.5

### Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЭК ООН и степени воздействия меры 5 в области управления ландшафтом

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЭК ООН	3 (3)	3 (3)	3 (3)	1	3 (3)	3 (3)
Степень воздействия	~?	↑? (↑)	~?	↓↓ (~)	↑ (↑↑)	↑ (↑↑)

<sup>a</sup> Категория ЭК ООН и степень воздействия здесь сравниваются с отсутствием каких-либо мер — например, когда загрязненные воды напрямую сбрасываются в ручьи и реки (например, базовый вариант представляет собой отсутствие мер). Значения в скобках показывают последствия по сравнению с базовой системой использования передовых методов, ориентированных на рекуперацию питательных веществ (глава IV) (Воздействие на подземные воды здесь не указывается).

### Управление ландшафтом — мера 6: Высадка болотных культур в прибрежных районах или в искусственных водно-болотных массивах

432. «Болотные растения» — это растения, произрастающие в экосистемах болот и сильно увлажненных территорий. Эти растения часто образуют значительную биомассу в период вегетации, тем самым забирая  $N_r$  из воды. Биомассу можно собирать и использовать, например в качестве источника биоэнергии (Ren and others, 2019). Типичными болотными растениями, используемыми для извлечения  $N_r$ , являются *Typha latifolia* (рогоз широколистный), *Arundo plinii* (арундо), *Arundo donax* (арундо тростниковый) или *Phragmites australis* (тростник обыкновенный).

433. Подтверждено, что высадка болотных культур в прибрежных районах позволяет эффективно снижать нагрузку  $\text{NO}_3^-$  в водотоках, хотя эффективность рекуперации  $\text{NO}_3^-$  зависит от взаимодействия между механизмами прибрежных гидрологических потоков, биогеохимическими процессами в почве и поглощением  $\text{N}_r$  растениями (например, Hill, 2019). В случае низкой эффективности управления этими водно-болотными массивами меры по смягчению воздействия  $\text{NO}_3^-$  вполне могут привести к увеличению выбросов ПГ —  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Необходимы дополнительные количественные данные о плюсах и минусах использования разных видов искусственных водно-болотных массивов. Следует признать, что акцент на денитрификации в искусственных водно-болотных массивах увеличивает потери  $\text{N}_2$ , что означает потерю ресурса  $\text{N}_r$  и снижение эффективности использования азота на уровне ландшафта. Преимущество таких искусственных водно-болотных массивов заключается в том, что они не требуют больших затрат, а риски — в том, что воздействие на другие выбросы  $\text{N}_r$  обычно не поддается количественной оценке. Хотя эффективный и быстрый рост болотных культур помогает снизить потери  $\text{N}_r$ , в периоды покоя (например, в зимний период, в сухой летний период), этот рост может быть ограниченным.

Таблица VI.6

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЕЭК ООН и степени воздействия меры 6 в области управления ландшафтом**

Форма азота	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН <sup>a</sup>	3 (3)	1 (3)	2 (3)	1 (3)	1 (3)	2 (3)
Степень воздействия <sup>a</sup>	~ (~?)	↓ (↑)	↓ (↑)	↓ (↑)	↓ (↑)	↓ (↑)

<sup>a</sup> Категория ЕЭК ООН и степень воздействия здесь сравниваются с искусственным водно-болотным массивом с неуправляемым ростом болотных культур, например с базовой системой. Значения в скобках показывают последствия по сравнению с базовой системой использования передовых процессов, ориентированных на рекуперацию питательных веществ (глава IV).

**Управление ландшафтом — мера 7: Использование органических слоев для интенсификации денитрификации**

434. Денитрификации, направленной на снижение содержания нитратов в воде, можно способствовать путем увеличения содержания органического углерода в почвах, отложениях и т. д. На практике это достигается путем создания так называемых денитрификационных барьеров в ландшафте (Bednarek and others, 2014). Этот термин может показаться не совсем понятным, но он широко используется для описания физических барьеров, способствующих денитрификации. Беднарек и соавторы (Bednarek and others, 2014) классифицируют денитрификационные барьеры следующим образом:

- а) денитрификационные стены — построены из богатых углеродом материалов, расположенных вертикально в грунтовых водах неглубокого залегания перпендикулярно течению этих вод;
- б) денитрификационные ложи — емкости, заполненные материалом, богатым углеродом; или как
- в) денитрификационные слои — горизонтальные слои материала, богатого углеродом.

435. Денитрификация — процесс, в ходе которого  $\text{NO}_3^-$  преобразуется в  $\text{N}_2$ . Это гетеротрофический микробиологический процесс, в котором для окисления органического вещества вместо кислорода в условиях его ограниченности в качестве альтернативного акцептора электронов используются нитраты. Во многих экологических ситуациях ограничивающим темпы денитрификации фактором

является наличие органического вещества. Поэтому создание богатого углеродом слоя можно использовать для стимулирования денитрификации.

436. Органические слои могут использоваться для стимулирования денитрификации как в вертикальных, так и в горизонтальных потоках воды. Полевые и лабораторные исследования показывают, что биореакторы на древесной щепе могут достигать эффективности удаления нитратов в диапазоне 80–100 %, при этом эффективность удаления зависит от типа и размера древесной щепы, степени гидравлической нагрузки и периода рекуперации между промывками, что влияет на скорость гидролиза лигноцеллюлозного субстрата для денитрификации (Lopez-Ponnada and others, 2017). Однако такие органические слои могут также способствовать продуцированию  $N_2O$  в процессе денитрификации. В анаэробных условиях могут также образоваться значительные объемы  $CH_4$ , что может создать в ландшафте точки концентрации выбросов ПГ (Davis and others, 2019). Так как этот метод направлен на стимулирование денитрификации, он снижает эффективность использования азота на уровне ландшафта, уменьшая потенциал рекуперации  $N_r$ .

Таблица VI.7

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЕЭК ООН и степени воздействия меры 7 в области управления ландшафтом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН <sup>a</sup>	3	3	3	1	3	3
Степень воздействия	~	↑	↑	↓↓	↑↑	↑↑

<sup>a</sup> Воздействия сравниваются с базовым сценарием, в котором технологии не используются и вода движется непосредственно в водотоки.

**Управление ландшафтом — мера 8: Управление дренажом**

437. Дренажные меры, такие как укладка керамических дрен (стимулирование стока и предотвращение переувлажнения) и регулирование уровня грунтовых вод, влияют на насыщение почвы кислородом (повышение доступности кислорода), увеличивая горизонтальный перенос воды и сокращая время удержания питательных веществ. Все эти факторы влияют на эффективность удаления  $N_r$ ; например, путем денитрификации (см. Ландшафтные меры 5–7). В итоге увеличение дренажа (например, за счет использования керамических дрен), должно способствовать уменьшению выбросов соединений  $N_r$  в связи с денитрификацией ( $N_2O$ ,  $N_2$ ). Напротив, сокращение времени удержания, вероятно, увеличит сток  $NO_3^-$  в речные воды. Поэтому эту меру можно считать подходящей только в тех случаях, когда снижение выбросов  $N_2O$  и  $N_2$  считается более важной задачей, чем борьба с загрязнением нитратами.

Таблица VI.8

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЕЭК ООН и степени воздействия меры 8 в области управления ландшафтом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3	1	3	3	2	3
Степень воздействия	~	↓ <sup>a</sup>	↓	↑ <sup>a</sup>	↓	~?

<sup>a</sup> Противоположное воздействие, если дренаж заблокирован!

### Управление ландшафтом — мера 9: Стимулирование удаления $N_r$ из прибрежных вод

438. Насыщенные  $N_r$  поверхностные и грунтовые воды могут напрямую попадать в моря, особенно в сельскохозяйственных регионах, расположенных вблизи побережья. Отмечалось, что морская трава, водоросли, устричные фермы или аквакультура моллюсков могут использоваться для удаления излишков питательных веществ из прибрежных вод (Clements and Comeau, 2019; Kellogg and others, 2014), поскольку азот, содержащийся в фитопланктоне, становится частью биомассы, которая в конечном итоге потребляется, например, в виде устриц, мидий или моллюсков. Однако сведения о степени воздействия на процесс удаления  $N_r$  различаются в зависимости от географии, времени года и условий произрастания (Kellogg and others, 2014). Хотя принцип поощрения рекуперации азота и его трансформации в полезные продукты является вполне обоснованным, необходимы дополнительные количественные данные об эффективности этой системы, прежде чем можно будет уверенно поддержать ее более широкое внедрения в целях смягчения последствий загрязнения прибрежных вод.

Таблица VI.9

#### Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЕЭК ООН и степени воздействия меры 9 в области управления ландшафтом

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	3	3	3	2	2	2
Степень воздействия	~	~	~	↓	↓	↓?

### 3. Облесение, временное выведение земель из севооборота и создание лесополос для смягчения последствий выбросов $N_r$

439. Выведение части сельскохозяйственных угодий из оборота является эффективным способом снижения всех форм прямого загрязнения окружающей среды азотом в результате сельскохозяйственной деятельности. При таком подходе сельскохозяйственные земли могут быть переведены под другие виды землепользования, позволяющие иммобилизовать  $N_r$  и тем самым сократить его каскадирование в ландшафтных масштабах. Хотя эта мера дает существенный местный эффект и может быть использована для ландшафтного планирования, она имеет и отрицательные косвенные последствия для сельскохозяйственного производства в целевом регионе. Для поддержания производства может потребоваться перевод интенсивного сельскохозяйственного производства в другие регионы или другие меры по повышению его эффективности. Такой подход к смягчению последствий применяется, в частности, на низкопродуктивных землях, где возможности сокращения выбросов  $N_r$  и другие ландшафтные преимущества легко перевешивают выгоды сохранения земель в сельскохозяйственном обороте.

### Управление ландшафтом — мера 10: Посадка деревьев в целях облесения и создания лесозащитных полос в ландшафте

440. Облесение и создание лесозащитных полос или полос деревьев вокруг сельскохозяйственных полей могут снизить уровень вымывания  $NO_3^-$  и оказывают весьма позитивное воздействие на биоразнообразие, например в том, что касается опылителей или запасов органического углерода в почве (Montoya and others, 2020; Thomas and Abbott, 2018; Holden and others, 2019; Ford and others, 2019). Сохранение существующих лесных массивов и лесозащитных полос поможет избежать потенциальных негативных последствий. Тем не менее эффективность лесозащитных полос для удержания  $N_r$  будет зависеть от: их размера и местоположения; количества  $NO_3^-$  в почве и грунтовых водах; направленности и времени возникновения гидрологических потоков; и ландшафтных биогеохимических условий в верхних и

нижних слоях почвы (Benhamou and others, 2013; Viaud and others, 2005). Существует риск того, что увеличение удержания азота может сопровождаться увеличением выбросов  $N_2O$  в почву, хотя ожидается, что чистый баланс ПГ в целом будет благоприятствовать сокращению чистых выбросов в связи с увеличением запасов почвенного углерода и биомассы многолетних растений (см. Butterbach-Bahl and others, 2011). Лесозащитные полосы и лесные опушки также выступают в качестве биофильтров для близлежащих источников выбросов  $NH_3$  (Kovář and others, 1996. См. также Ландшафтную меру 12).

Таблица VI.10

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЕЭК ООН и степени воздействия меры 10 в области управления ландшафтом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	1	3	3	1	3	1
Степень воздействия	↓ <sup>a</sup>	↓↑ <sup>a</sup>	↓↑ <sup>a</sup>	↓↓	↑	↓↓

<sup>a</sup> Воздействие будет зависеть от конфигурации источников и поглотителей  $N_f$  в ландшафте. Увеличение азотных поглотителей между сельскохозяйственной территорией и водотоком является эффективным средством смягчения последствий потерь  $NO_3^-$ . Для смягчения последствий выбросов  $NH_3$  необходимы крупные лесопосадки за исключением случаев, когда все происходит вблизи точечных источников (Управление ландшафтом — мера 12). Улавливание выбросов  $N_f$  в виде  $NH_3$  чревато риском попадания дополнительных объемов  $N_2$ ,  $NO_x$  и  $NO_3^-$  в почву, если только излишки  $N_f$  не используются в процессе роста растений.

**Управление ландшафтом — мера 11: Резервные и другие неудобряемые луговые угодья**

441. Неудобряемые луга (например, «резервные» луговые угодья) потенциально способны удалять  $NO_3^-$  из горизонтальных почвенных гидрологических потоков и могут использоваться в качестве буферов для защиты прилегающих естественных земельных и водных ресурсов. Биомассу можно заготавливать на корм скоту. Неудобряемые луга также, как правило, отличаются большим биологическим разнообразием по сравнению с удобряемыми лугопастбищными угодьями. Трансформация пахотных земель в неудобряемые луговые угодья ведет к увеличению запасов углерода в почве. Данная мера в основном направлена на снижение вымывания нитратов в тех случаях, когда резервные земли расположены вблизи водотоков. Эффективность этой меры зависит от сокращения общего поступления азота в ландшафт. При соответствующем планировании существует также возможность свести денитрификационные выбросы к  $N_2$ , но для подтверждения этого необходим дальнейший анализ.

Таблица VI.11

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЕЭК ООН и степени воздействия меры 11 в области управления ландшафтом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН <sup>a</sup>	3	2	2	1	2–3	1
Степень воздействия	~	~↓	~↓	↓↓	↓	↓↓

<sup>a</sup> Данная мера признается здесь эффективной в том случае, если создание резервов подразумевает пропорциональное сокращение поступления азота в сельскохозяйственный ландшафт. Увеличение внесения азота для поддержания прежнего уровня сельскохозяйственного производства может быть чревато как плюсами, так и минусами с точки зрения загрязнения (см. ландшафтную меру 10).

#### 4. Смягчение каскадных последствий выброса $N_f$ в местах сосредоточения домашнего скота

442. Животноводческие объекты, включая помещения для стойлового содержания скота, хранилища навоза или места кормления и отдыха скота, содержащегося на открытом воздухе, являются «эпицентрами» загрязнения окружающей среды  $N_f$  вследствие волатилизации аммиака, выбросов  $N_2O$  и вымывания  $NO_3^-$ . Эта модель может быть использована для сглаживания зачастую очень высоких точечных выбросов азота животноводческими хозяйствами. Возможные подходы включают: использование защитных поясов вокруг крупных точечных источников; и «умное» перемещение животноводческих объектов и животных, содержащихся на открытом воздухе, в пределах ландшафта; например, подальше от чувствительных природных территорий, таких как природоохранные зоны, ручьи и т. д.

##### Управление ландшафтом — мера 12: Защитные пояса вокруг крупных точечных источников

443. Создание защитных поясов в форме, например, лезозащитных полос или резервных земель может помочь смягчению последствий распространения азота в ландшафте из точек концентрации выбросов, таких как навозохранилища или помещения для содержания скота. В основе этого лежит функция деревьев и лесополос как биофильтров для  $NH_3$ , а также их роль в стимулировании дисперсии, снижающей местные уровни концентрации (Theobald and others, 2001; Bealey and others, 2014). Этот подход также благоприятствует иммобилизации  $N_f$  в растительной биомассе и запасах органического азота в почве (Valkama and others, 2019). Доказано, что защитные пояса активно способствуют дисперсии и улавливанию  $NH_3$  в воздухе, в то же время увеличивая запасы C и N в почве, расширяя биоразнообразие и т. д. (Haddaway and others, 2018). Таким образом, защитные пояса могут также сокращать вымывание  $NO_3^-$  за счет поглощения азота растениями и/или иммобилизации в запасах органического азота в почве. Однако иммобилизация  $N_f$  в форме  $NH_3$  и  $NO_3^-$  может привести к увеличению выбросов  $N_2O$  в почву, хотя, учитывая наблюдаемый рост запасов органического углерода в почве, чистый баланс ПГ, по всей видимости, останется положительным. Эта мера отличается от ландшафтной меры 10 по своей функции и воздействию. В данном случае основное внимание уделяется действиям вблизи точечных источников, где биоразнообразию может быть причинен вред по причине улавливания больших объемов  $N_f$ , присутствующего в окружающей среде, что должно рассматриваться как часть издержек данной меры.

444. В случае использования деревьев для смягчения последствий выбросов аммиака исследования показали, что решающее значение для успеха этой меры имеют структура, расположение и площадь посадок (например, Dragosits and others, 2006; Bealey and others, 2014). Например, для обеспечения улавливания в существенных объемах в отличие от простого увеличения дисперсии требуется значительное количество деревьев. Исследования продемонстрировали увеличение выбросов  $N_2O$  и  $NO_x$  из лесных почв вблизи птицеводческих хозяйств, являющихся источником больших объемов  $NH_3$ , что указывает на необходимость взвешивания всех плюсов и минусов (Skiba and others, 2006). Надлежащее планирование высадки деревьев (например, быстрорастущие виды с высоким потенциалом поглощения азота) может обеспечить максимальную чистую выгоду и свести к минимуму возможные минусы.

445. Учитывая плюсы и минусы использования защитных поясов и других лесных угодий в качестве буферов с целью повышения устойчивости ландшафта к воздействию азота, важно понимать, что подход подходит не во всех контекстах. Например:

а) едва ли целесообразно использовать лесные массивы, которые в первую очередь предназначены для сохранения олиготрофных видов растений, в качестве буфера на пути азотного загрязнения (например, участки, указанные в Директиве Европейского союза о средах обитания), так как это вполне может привести к негативному воздействию на самую охраняемую среду обитания;

b) преследуя конкретную цель повысить буферный потенциал и устойчивость ландшафта, скорее, целесообразно сажать лес на бывших сельскохозяйственных землях. Эти посадки могут быть спланированы таким образом, чтобы помочь защитить приоритетные естественные места обитания.

Таблица VI.12

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЭЖ ООН и степени воздействия меры 12 в области управления ландшафтом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЭЖ ООН	1	3	3	2	3	3
Степень воздействия	↓	↑ <sup>a</sup>	↑ <sup>a</sup>	↓↑ <sup>a</sup>	~?	↓↑?

<sup>a</sup> Воздействие будет зависеть от конфигурации источников и поглотителей  $N_r$  в ландшафте. И наоборот, улавливание деревьями азота, выделяемого в виде  $NH_3$  животноводческими фермами, может привести к увеличению почвенных потерь  $N_2$ ,  $NO_x$  и  $NO_3^-$ , если только использование быстрорастущих деревьев не обеспечит улавливания всего избыточного  $N_r$  деревьями.

**Управление ландшафтом — мера 13: Экологически рациональное размещение животноводческих объектов и животных на пастбищном содержании**

446. Животноводческие объекты, места кормления и отдыха животных на пастбищном содержании могут являться крупными точечными источниками  $NH_3$  и  $NO_3^-$ . Поэтому такие объекты должны, насколько это возможно, располагаться вдали от чувствительных мест обитания на суше или водоемов (Panagopoulos and others, 2013). Это может значительно снизить остроту местных проблем с  $N_r$ , но может потребовать перемещения или даже закрытия существующих объектов. Этот подход наиболее часто используется в рамках процедур планирования новых мер в связи с предлагаемым расширением существующих хозяйств. В частности, в тех случаях, когда защита природных территорий осуществляется на основе норм законодательства (например, объектов сети «Натура-2000» на территории Европейского союза), отказ от интенсивного расширения хозяйств в непосредственной близости может быть одним из наиболее разумных подходов к предотвращению негативного воздействия на среды обитания, нуждающиеся в приоритетной защите. Для поддержки принятия решений на местном уровне могут использоваться простые онлайн-инструменты, такие как упрощенная модель расчета пределов атмосферного воздействия<sup>34</sup> (Theobald and others, 2009).

Таблица VI.13

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЭЖ ООН и степени воздействия меры 13 в области управления ландшафтом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЭЖ ООН	1	3	3	1	3	1
Степень воздействия	↓	~	~	↓	~	↓

<sup>34</sup> См. URL: <http://www.scail.ceh.ac.uk/>.

## 5. «Умное» ведение сельского хозяйства в пределах ландшафта

447. Зачастую существуют широкие возможности для оптимизации использования природных ресурсов в ландшафтном масштабе. Такая оптимизация позволяет повысить эффективность использования поступающего азота (и добиться общего снижения различных видов потерь), а также (с географической точки зрения) сократить выбросы азота в окружающую среду, особенно там, где уязвимость к определенным видам азотсодержащих соединений является наибольшей.

### Управление ландшафтом — мера 14: Цифровое планирование землепользования на основе оценки пригодности земель

448. Планирование землепользования и сельскохозяйственного производства на основе цифровых трехмерных высокоточных карт удержания азота может помочь оптимизировать использование удобрений и снизить вымывание азота и другие потери. Например, известно, что богатые глиной и углеродом почвы обладают более высокой способностью удерживать  $N_r$ , чем песчаные и бедные углеродом почвы, что может быть использовано для определения норм внесения удобрений.

449. Аналогичным образом, цифровые двухмерные сверхточные карты подповерхностного удержания  $N_r$  также могут использоваться для оптимизации использования удобрений и сведения к минимуму воздействие на грунтовые и/или поверхностные воды (Højbjerg and others, 2015). Кроме того, мерам по сокращению выбросов  $NH_3$  в ходе полевых работ (например, разбрасывание навозной жижи) и тем самым по повышению эффективности использования  $N_r$  можно придать целенаправленный характер в пространстве и во времени. Оптимизация землепользования и управления земельными ресурсами (например, выбор места для посадочных площадей и севооборота в пределах ландшафта, создание защитных поясов или водно-болотных массивов и т. д.) позволяет уменьшить каскадирование  $N_r$ . Это поможет улучшить удержание питательных веществ в ландшафтном масштабе, повысить качество воды в поверхностных и грунтовых водах и снизить газообразные выбросы  $N_r$ . Однако оптимизация землепользования требует понимания ландшафтных потоков. Как правило, ее необходимо подкреплять детальным моделированием, основанным на правильном понимании почв, потоков грунтовых и поверхностных вод, газообразных переносов в почвенно-растительно-атмосферной цепочке, подповерхностных геологических и геохимических характеристик, а также экономических ограничений (Nguyen and others, 2019; Todman and others, 2019).

Таблица VI.14

### Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЕЭК ООН и степени воздействия меры 14 в области управления ландшафтом

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие потери азота
Категория ЕЭК ООН	2	2	2	2	2–3 <sup>a</sup>	2
Степень воздействия	↓	↓	↓	↓↓	↓	↓↓

<sup>a</sup> Для демонстрации эффективности необходимы дополнительные данные.

### Управление ландшафтом — мера 15: Переход к смешанному сельскому хозяйству

450. Смешанное сельское хозяйство сочетает в себе животноводство и растениеводство в масштабе отдельных хозяйств и всего ландшафта. Оно открывает возможность увязать поступление азота с его излишками с целью сокращения общих уровней азотного загрязнения и повышения эффективности использования азота в масштабах ландшафта. Примером обратного может служить ситуация, когда из районов, где расположены зерновые хозяйства, зерно поставляется в животноводческие районы, где образуется избыток навоза, который не может быть использован на месте. Поэтому сочетание земледелия и животноводства на местном уровне может помочь уменьшить загрязнение окружающей среды (например, Key Action 10 in Sutton and others, 2013; Wilkins and others, 2008).

451. Сочетание возможностей, открывающихся благодаря смешанному земледелию, с ландшафтным планированием дает основания рассчитывать на синергический эффект (Управление ландшафтом — мера 14). Цель заключается в том, чтобы добиться оптимальной структуры завоза/производства навоза и кормов между полем и фермой (Asai and others, 2018; Garrett and others, 2017). Планирование и развитие различных типов сельского хозяйства будет зависеть от особых региональных производственных возможностей или экологических целей для данной местности. Например, выращивание сельскохозяйственных культур, связанное с высокими выбросами  $N_f$  в окружающую среду, можно перенести в другие районы и заменить экстенсивным сельскохозяйственным производством, не требующим большого объема ресурсов, если поля находятся вблизи природоохранных зон. Восстановление связи растениеводство — животноводство повышает общую эффективность использования азота на уровне ландшафта и, как было доказано, снижает излишки азота и загрязнение воды (Garnier and others, 2016).

452. Системы смешанного сельского хозяйства, объединяющие растениеводство и животноводство, также дают возможность развивать свободновыгульное животноводство в сочетании с выращиванием культур, которые снижают потери  $N_f$  (например, деревья, Управление ландшафтом — мера 12). И наоборот, свою роль могут играть и высокотехнологичные системы стойлового содержания скота, позволяющие контролировать поступление и выбросы веществ на уровне отдельных сегментов ландшафта. Поскольку стойловые системы содержания скота ассоциируются со значительно большими выбросами  $NH_3$ , необходимо использовать подходящие технические варианты сокращения выбросов в процессе содержания скота, хранения и использования навоза, рассматривая, в том числе, различные варианты рекуперации  $N_f$  (главы IV и V).

Таблица VI.15

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЕЭК ООН и степени воздействия меры 15 в области управления ландшафтом**

Форма азота	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Общие
						потери азота
Категория ЕЭК ООН	2	2	2–3 <sup>a</sup>	2	2–3 <sup>a</sup>	2
Степень воздействия	↓↓	↓↓	↓↓?	↓↓	↓↓?	↓↓

<sup>a</sup> Для демонстрации эффективности необходимы дополнительные данные.

**Управление ландшафтом — мера 16: Выбор технических решений для снижения потерь  $N_f$**

453. В главах IV и V настоящего руководящего документа дается описание целого ряда технических решений, включая использование удобрений замедленного действия, ингибиторов мочевины или нитрификации, подкисления навоза и внутрипочвенное внесение жидкого навоза. Такие меры полезны также на ландшафтном уровне, где они целенаправленно используются в конкретных чувствительных районах. Например, в непосредственной близости от заповедников — местных природных заказников или территорий, отнесенных к международно охраняемым в соответствии с Конвенцией о водно-болотных угодьях, имеющих международное значение, особенно в качестве местобитаний водоплавающих птиц, могут быть установлены более амбициозные требования (например, требования к стойловому содержанию скота с очень низким уровнем выбросов, хранению и внесению навоза). Планирование использования технических мер в ландшафтном контексте требует понимания различных экологических приоритетов и их местного, национального и международного законодательного контекста. Например, в Европейском союзе, согласно Директиве Европейского союза о средах обитания, особым природоохранным зонам (требующим осторожного подхода) предоставляется более высокий уровень правовой защиты чем тот, который может потребоваться для местного заказника (применительно к которому возможен баланс экономических и экологических целей).

454. Анализ в ландшафтном масштабе также позволит более детально проанализировать потенциальные плюсы и минусы и синергические связи между сокращением выбросов и смягчением воздействия различных соединений азота. Например, внутрипочвенное внесение жидкого навоза или подкисление навозной жижи может значительно сократить улетучивание  $\text{NH}_3$  и сохранить больше азота в почве, что может повысить риск вымывания  $\text{NO}_3^-$  и выбросов  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$ . И наоборот, применение этих мер может по аналогии повысить эффективность усвоения азота растениями, что поможет соответствующим образом снизить потребность в поступлении свежего  $\text{N}_r$  из удобрений и биологической фиксации азота. Таким образом можно повысить эффективность использования азота и сократить потерю азота на уровне ландшафта в целом. Применение технических мер в масштабе ландшафта позволяет учитывать эти взаимосвязи (Theobald and others, 2004); например, сокращение выбросов  $\text{NH}_3$  приведет к меньшему выпадению азота на лесные и другие природные территории (Dragosits and others, 2006), что, в свою очередь, может привести к сокращению косвенных выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2\text{O}$  в этих экосистемах (Cellier and others, 2011).

Таблица VI.16

**Сводная информация о каждой форме потерь азота по категориям эффективности/практической возможности осуществления мер ЕЭК ООН и степени воздействия меры 16 в области управления ландшафтом**

Форма азота						Общие
	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	потери азота
Категория ЕЭК ООН	2	2	3	2	3	2
Степень воздействия	↓↓	↓	↓? <sup>a</sup>	↓↓	↓? <sup>a</sup>	↓

<sup>a</sup> О положительном воздействии на  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2$  имеется меньше данных, хотя можно ожидать соответствующего воздействия на  $\text{N}_2\text{O}$ .

Таблица VI.17

**Сводная информация о мерах в области землепользования и управления ландшафтом и их воздействии на потери азота**

Практика	Воздействие					Принцип	
	$\text{NH}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$		Все вещества
<i>Меры, конкретно касающиеся возделываемых культур и севооборота</i>							
Управление ландшафтом — мера 1: Увеличение площадей под многолетними культурами	3 ~	2 ↓↑	3 ?	1 ↓↓	3 ↓↑	1 ↓	Постоянный растительный покров, высокая продуктивность, быстрая иммобилизация внесенного $\text{N}_r$ в органических веществах почвы и в растительной биомассе.
Управление ландшафтом — мера 2: Использование промежуточных культур	3 ~	2 ↓↑	2 ↓↑	1 ↓	3 ~?	1 ↓	Удобрения и навоз должны вноситься с поправкой на содержание накопленного азота. Выбросы $\text{N}_2\text{O}$ и $\text{NO}_x$ могут увеличиваться при наличии промежуточных культур в почве.

Практика	Воздействие						Принцип
	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Все вещества	
Управление ландшафтом — мера 3: Включение $N_2$ -фиксирующих культур в севооборот	2 ~↓	2 (3) ↓(↑)	3 (3) ↓(↑)?	2 (3) ↓(↑)	3 (3) ~?	2 (3) ↓(?)	Сокращение использования минерального $N_r$ , минерализация органического азота лучше соотносится с потребностями растений в азоте (значения в скобках отражают эффект увеличения запасов азота в почве).
Управление ландшафтом — мера 4: Внедрение агролесоводства	1 ↓	3 ~↑	3 ~↑	1 ↓↑	3 ~3	1 ↓	Сочетание однолетних и многолетних культур, непересекающиеся освоение корнеобитаемого слоя, увеличение удаления азота с каждого участка.
<i>Меры по управлению прибрежными районами и водами</i>							
Управление ландшафтом — мера 5: Искусственные водно-болотные угодья для стимулирования удаления $N_r$	3 (3) ~?	3 (3) ↑ ? (↑)	3 (3) ~?	1 ↓↓ (~)	3 (3) ↑ (↑↑)	3 (3) ↑ (↑↑)	Стимуляция удаления $N_r$ путем денитрификации (значения в скобках сравниваются с базовым подходом, предусматривающим использование передовых методов обработки воды с рекуперацией питательных веществ).
Управление ландшафтом — мера 6: Высадка болотных культур в прибрежных районах или в искусственных водно-болотных массивах	3 (3) ~ (~?)	1 (3) ↑	1 (3) ↓ (↑)	2 (3) ↓ (↑)	1 (3) ↓ (↑)	2 (3) ↓ (↑)	Фиксация $N_r$ в биомассе, которая может быть собрана (значения в скобках сравниваются с базовым подходом, предусматривающим использование передовых методов переработки и рекуперации питательных веществ).
Управление ландшафтом — мера 7: Использование органических слоев для интенсификации денитрификации	3 ~	3 ↑	3 ↑	1 ↑↑	3 ↑↑	3 ↑	
Управление ландшафтом — мера 8: Управление дренажом	3 ~	1 ↓*	3 ↓	3 ↑*	2 ↓	2 ~?	Аэрация почвы, которая затрудняет удаление нитратов, но облегчает вымывание азота (*Противоположное воздействие, если сливы заблокированы!).

Практика	Воздействие						Принцип
	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Все вещества	
Управление ландшафтом — мера 9: Стимулирование удаления $N_f$ из прибрежных вод	3 ~	3 ~	3 ~	2 ↓	2 ↑	2 ↓?	Деятельность по восстановлению $N_f$ в урожаях; например, высадка морской травы, выращивание морских водорослей, выращивание и сбор мидий.
<i>Облесение, временное выведение земель из севооборота и создание лесополос для смягчения последствий выбросов <math>N_f</math></i>							
Управление ландшафтом — мера 10: Посадка деревьев в целях облесения и создания лесозащитных полос в ландшафте	1 ↓	3 ↓↑	3 ↓↑	1 ↓↓	3 ↑	1 ↓↓	Выборочная рубка, лесоводство/управление лесами непрерывного цикла. Посадка на крутых склонах.
Управление ландшафтом — мера 11: Резервные и другие неудобряемые луговые угодья	3 ~↓	2 ~↓	2 ~	1 ↓↓	2-3 ↓	1 ↓↓	Выведение земель из севооборота может включать в себя сбор биомассы.
<i>Смягчение каскадных последствий выброса <math>N_f</math> в местах сосредоточения домашнего скота</i>							
Управление ландшафтом — мера 12: Защитные пояса вокруг крупных точечных источников	1 ↓	3 ↑	3 ↑	2 ↓↑	3 ~?	2 ↓↑?	Улавливание аммиака. Рассеивание остатков вверх (полезно, если поблизости находится чувствительная к N экосистема). Иммобилизация $N_f$ в растительной биомассе.
Управление ландшафтом — мера 13: Экологически рациональное размещение животноводческих объектов и животных на пастбищном содержании	1 ↓	3 ~	3 ~	1 ↓	3 ~	1 ↓	Размещение животноводческих объектов вдали от чувствительных к $N_f$ экосистем снижает воздействие.
<i>«Умное» ведение сельского хозяйства в пределах ландшафта</i>							
Управление ландшафтом — мера 14: Цифровое планирование землепользования на основе оценки пригодности земель	2 ↓	2 ↓	2 ↓	2 ↓↓	2-3 ↓	2 ↓↓	Объемы внесения удобрений зависят от свойств почвы, основного материала, культур и т. д.; Размещение культур зависит от особенностей ландшафта.
Управление ландшафтом — мера 15: Переход к смешанному сельскому хозяйству	2 ↓↓	2 ↓↓	2-3 ↓↓?	2 ↓↓	2-3 ↓↓?	2 ↓↓	Помогает перейти к сельскому хозяйству замкнутого цикла. Улучшение распределения навоза и производства кормов.

Практика	Воздействие						Принцип
	$NH_3$	$N_2O$	$NO_x$	$NO_3^-$	$N_2$	Все вещества	
Управление ландшафтом — мера 16: Выбор технических решений для снижения потерь $N_f$	2 ↓↓	2 ↓	3 ↓?	2 ↓↓	3 ↓?	2 ↓	Использование высокоэффективных, но дорогостоящих методов вблизи чувствительных экосистем.

*Примечание:* содержащаяся в приведенной выше таблице сводная информация включает оценочную степень воздействия для конкретных перечисленных вспомогательных мер: стрелки вверх или вниз обозначают направление воздействия, знак ~ — очень слабое/отсутствующее воздействие, а сдвоенные стрелки — наибольшее воздействие. Категории 1, 2, 3 ЕЭК ООН являются оценочными. Если не указано иного, за базовый берется вариант «бездействия».

455. Таким образом, рассмотренные меры в области землепользования и управления ландшафтом позволяют эффективно снизить общий уровень азотного загрязнения и могут способствовать повышению результативности мер, рассмотренных в главах IV и V, в случае их целенаправленного применения в пространстве и/или во времени. Ландшафтные меры могут быть очень эффективными в смягчении местных последствий выброса  $NO_3^-$  и  $NH_3$ . Тем не менее при принятии мер для достижения местных целей по сокращению выбросов на конечных этапах процесса следует тщательно оценивать и другие виды выбросов  $N_f$  и азотного загрязнения за пределами ландшафта.

## Н. Приоритеты для фермеров и других специалистов-практиков

456. Основные меры в области землепользования и управления ландшафтом, которые должны быть реализованы на практике, можно разделить на две группы: географически акцентированные меры, направленные на изменение практики землепользования; и меры, связанные с адаптацией методов управления к географическим условиям.

457. В числе основных мер по изменению практики землепользования, определенных в ходе практикумов, которые были организованы Генеральным директором по окружающей среде Европейской комиссии и Целевой группой по химически активному азоту в рамках Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния в 2016 и 2019 годах, можно назвать:

- a) использование земель в качестве резервов/лугопастбищных угодий (без использования удобрений);
- b) создание прибрежных буферных полос или буферных полос для сохранения биоразнообразия вокруг или внутри полей (отличие заключается в близости к водной среде):
  - i) создание лесозащитных полос и облесение;
  - ii) изменение севооборота/переход на многолетние культуры (например, для создания постоянных лугопастбищных угодий);
  - iii) агролесоводство;
  - iv) восстановление водно-болотных угодий и водотоков и/или создание мини водно-болотных массивов.

458. Для сравнения, предлагаемые варианты управления включают в себя географически акцентированное осуществление таких мер, как:

- a) обработка и сохранение почвы (например, отказ от вспашки органических почв);
- b) дренажные мероприятия и регулируемый дренаж;
- c) управление лугопастбищными угодьями;

- d) выбор места для животноводческих хозяйств;
- e) пространственное распределение (перераспределение) навоза;
- f) фертигация и установка надлежащих систем орошения для сухих посевных площадей;
- g) размещение биогазовых установок и биоперерабатывающих предприятий для перераспределения биомассы.

459. Отмечается увеличение числа фермеров, переходящих на методы, традиционно именуемые «регенеративным сельским хозяйством», некоторые из которых способны в определенной мере сократить потери азота, включая беспашотные методы, органическое сельское хозяйство (отказ от синтетических неорганических удобрений и акцент на биологической фиксации азота), деятельность, направленную на увеличение улавливания углерода, и т. д. Такие методы требуют более глубокого анализа для количественной оценки их эффективности применительно ко всем видам потерь азота.

460. Для рассмотрения последствий таких мер могут быть подготовлены национальные руководства. В таблице VI.2 приведены полученные Эриксоном и соавторами (Eriksen and others, 2014) данные для некоторых из перечисленных мер, позволяющие, в том числе, сравнить экономические издержки с бюджетной и социальной точек зрения (например, экономические последствия для сельского хозяйства в сравнении с более широкими экономическими последствиями для благосостояния общества). Для фермеров и всех тех, кто имеет практическое отношение к сельскому хозяйству, наиболее важным фактором при принятии решения о том, применять или не применять предложенные меры, будут экономические издержки и соответствующие возможности для их возмещения или получения платы за предоставленные экосистемные услуги. Это подчеркивает важность оценки экономических затрат, подобной той, которая приводится в таблице VI.18, как с точки зрения производственных издержек фермеров, так и в плане более широких социально-экономических издержек, имеющих значение для директивных органов. Необходима дальнейшая работа по вопросу о том, как следить за успешностью мер на ландшафтном уровне.

Таблица VI.18

**Примеры обобщенных эффектов в виде сокращения вымывания азота из корнеобитаемого слоя почвы и соответствующих бюджетных и социально-экономических издержек**

<i>Мера</i>	<i>Замечания</i>	<i>Годовой N-эффект (кг N/га)</i>	<i>Бюджетно-экономические издержки (евро/кг N)</i>	<i>Социально-экономические издержки (евро/кг N)</i>
Резервные земли	При севообороте	50	4–25	5–34
Прибрежные буферные полосы	Переход от севооборота к долголетним пастбищам	37–74	6–12	8–16
Облесение	При севообороте	50	7–20	9–27
Мини водно-болотные массивы	Поверхностный сток	5–20	3–23	4–31

*Примечание:* примеры обобщенных эффектов в виде сокращения вымывания азота из корнеобитаемого слоя почвы и соответствующих бюджетных и социально-экономических издержек (например, экономических последствий для сельского хозяйства в сравнении с более широкими экономическими последствиями для общества) согласно Eriksen and others (2014). Другие связанные с азотом эффекты для природы и климата, а также побочные эффекты, связанные с фосфором и пестицидами, также перечислены этими авторами, но здесь они не указаны.

461. В соответствии с общими руководящими принципами рекомендация о внедрении эффективных методов землепользования и управления ландшафтом фермерами и другими специалистами-практиками предусматривает те же меры, что и для директивных органов (см. таблицу VI.17). Рекомендуются, чтобы помимо оценки экономических издержек, каждое хозяйство рассчитывало экологические выгоды на уровне хозяйства или ландшафта. Такие «зеленые счета» должны содержать подробную разбивку оценочного эффекта от принимаемых мер и важнейшие данные о принятых мерах и их эффективности. Эти сведения можно включить в центральную базу данных, что позволит проводить оценку воздействия для целых ландшафтов, водосборных бассейнов и т. д., а также конкретных целевых показателей по сокращению выбросов азота для каждого из них.

462. Например, в соответствии с правилами, действующими в некоторых странах ЕЭК ООН, конкретные целевые показатели по сокращению вымывания азота устанавливаются для каждого водораздела на основе результатов моделирования или реальных измерений. В рамках системы, действующей в Дании, фермеры, находящиеся в пределах водосборного бассейна, могут добровольно принять меры (например, посадить почвозащитные культуры) и ежегодно получать финансовые стимулы для достижения целевых показателей, установленных для всего водосборного бассейна. Альтернатива заключается в том, что от фермеров могут потребовать в обязательном порядке сажать почвозащитные культуры до тех пор, пока не будет достигнут общий целевой показатель. Таким образом, действующие правила являются более акцентированными с географической точки зрения и более эффективными с точки зрения затрат.

## I. Резюме выводов и рекомендаций

463. Общие рекомендации резюмируются во вставке VI.2 ниже. Эти рекомендации согласуются с выводами предыдущих исследований, например с главой Европейской оценки азота, посвященной азотным потокам и судьбе азота в сельских ландшафтах (Cellier and others, 2011), и включают следующие ключевые моменты и аргументы, обосновывающие необходимость разработки новых подходов:

a) смягчение последствий азотного загрязнения в ландшафтном масштабе требует учета взаимосвязи между природными и антропогенными процессами, включая управление сельскохозяйственными и другими земельными ресурсами;

b) сложный характер и большая площадь сельских ландшафтов означают, что экспериментальная оценка потоков химически активного азота в этих масштабах сопряжена с трудностями и часто не дает полной картины. При этом она должна включать в себя измерение азотных потоков в различных сегментах окружающей среды, а также комплексные наборы данных о состоянии окружающей среды (почва, гидрология, землепользование и т. д.) и об управлении сельскохозяйственными предприятиями.

### Вставка VI.2

#### **Резюме принципов и рекомендаций по смягчению последствий азотного загрязнения в процессе землепользования и управления ландшафтом, сформулированных по итогам многостороннего обсуждения**

Азотный бюджет в ландшафтном масштабе, учитывающий основные потоки  $N_r$  и все источники и поглотители  $N_r$  в пространстве и времени, закладывает базу для проведения более комплексной оценки  $N$  в целях определения адресных мер.

Для более эффективного управления ресурсами  $N_r$  и работы в рамках тех пределов, которые диктует ситуация с  $N_r$  на конкретной территории, необходим пространственно-акцентированный подход к составлению азотного бюджета.

Составление бюджета  $N_r$  особенно актуально в тех случаях, когда условия остаются стабильными с течением времени (например, когда сельскохозяйственные

системы не находятся на переходном этапе), а также применительно к годовому учету азота. Кроме того, важное значение имеет оценка динамики азота в более краткосрочной и долгосрочной перспективе.

Ландшафтный рельеф и свойства почв являются важными факторами, определяющими судьбу  $N_r$  в ландшафтных масштабах, а использование трехмерных почвенных и геологических карт важно для понимания потоков  $N_r$  и вариантов смягчения последствий, в частности, в связи с вымыванием  $N_r$ .

Ландшафтная оценка включает в себя оценку как источников, так и поглотителей, например в точках концентрации выбросов и попадания/приема  $N_r$  в экосистемах, включая воздействие на уязвимые участки и водные объекты, а также воздействие атмосферного загрязнения азотом на наземные среды обитания.

Определенный объем выбросов  $N_r$  может иметь разные последствия в разных местах ландшафта. Это означает, что ландшафтные меры дают возможность оптимально использовать свойства ландшафта и его неоднородность применительно к потокам и воздействию азота.

Процессы, сопровождающиеся выбросами азота, предполагают нелинейные взаимодействия: эти процессы являются порогово-зависимыми и связаны с острыми стрессогенными факторами. Рассмотрение этих стрессогенных факторов по отдельности или упрощенно в сумме может привести к замене загрязнителей и, таким образом, к недооценке будущих рисков, связанных с азотом, включая эвтрофикацию, подкисление и изменения в лесах и других наземных экосистемах, а также в функциях и разнообразии водных систем.

Для достижения многочисленных целей в области устойчивого развития, актуальных для ландшафтов в целом, необходимо сочетание нескольких мер по смягчению последствий выбросов  $N_r$ . Они должны быть расставлены в порядке важности, так как в конкретном контексте смягчение последствий действия одних механизмов азотного загрязнения может быть важнее чем других.

При оценке последствий мер по смягчению последствий азотного загрязнения следует учитывать как локальные, так и глобальные последствия прямых выбросов азота в ландшафте, а также косвенные выбросы азота, спровоцированные как внутри ландшафта, так и за его пределами.

Ландшафтные меры дают возможность увеличить удержание и связывание азота в пространстве и времени и, таким образом, увеличить содержание азота в собранном урожае и рекуперацию питательных веществ, оптимизировать перераспределение навоза и уменьшить воздействие на водную среду, одновременно содействуя развитию биоэкономики.

Для эффективной реализации мер в ландшафтном масштабе важны операционная единица и связанные с ней экономические выгоды и/или плюсы, и минусы, которые варьируются от фермы к ферме и от фермы к ландшафту и дальше (например, водосборный бассейн, местный и региональный масштабы). Правовая база может способствовать оптимальной реализации мер. Для содействия осуществлению мер в масштабе ландшафта необходимо применение новых инструментов, адаптированных к специфике ландшафта. Это может также способствовать укреплению культурных и природных инфраструктур в целях более устойчивого использования азота.

464. Моделирование является наилучшим инструментом для изучения сложных взаимосвязей между антропогенными и природными процессами в ландшафтном масштабе. Требуется также верификация посредством проведения измерений, и следует рассмотреть возможность проведения простых замеров, например концентрации  $NO_3^-$  в потоках. Нужно признать, что существует значительный временной лаг между реализацией мер регулирования и реагированием на них концентрации  $NO_3^-$  в речной воде. Однако на сегодняшний день только модель NitroScare, которая впервые была разработана для виртуальных ландшафтов (Duret

and others, 2011, в рамках объединенного проекта NitroEurope) и которая лишь в последнее время стала применяться к реальным ландшафтам (например, Franqueville and others, 2018, в рамках французского проекта Escapade), объединила в себе все компоненты потоков N в масштабах ландшафта: функционирование хозяйств; атмосферный перенос на короткие расстояния; и гидрологию и моделирование экосистем. Следовательно, настоятельно рекомендуется продолжать разработку и тестирование таких моделей, а также интегрировать их в новые инструменты оценки ландшафта и содействия принятию решений.

465. В заключение следует отметить, что как с экологической, так и с социально-экономической точки зрения важно включать меры по управлению ландшафтом и землепользованию в стратегии смягчения последствий азотного загрязнения. В настоящей главе рекомендуется двухэтапная методическая процедура осуществления мер по смягчения последствий выбросов азота, а также перечисляются отдельные основные меры, актуальные для директивных органов, фермеров и тех, кто сталкивается с этими проблемами в практической работе.

## J. Справочная литература

- Abdalla, M., Hastings, A., Cheng, K., Yue, Q., Chadwick, D., Espenberg, M., Truu, J., Rees, R.M., Smith, P. 2019. A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Global Change Biology* **25**, 2530–2543.
- Andersen, P.S., Andersen, E., Graversgaard, M., Christensen, A.A., Vejre, H., Dalgaard, T. 2019. Using landscape scenarios to improve local nitrogen management and planning. *Journal of Environmental Management* **232**, 523–530.
- Asai, M., Moraine, M., Ryschawy, J., de Wit, J., Hoshide, A.K., Martin, G. 2018. Critical factors for crop-livestock integration beyond the farm level: A cross-analysis of worldwide case studies. *Land Use Policy* **73**, 184–194.
- Audet, J., Zak, D., Hoffman, C.C. 2020. Nitrogen and phosphorus retention in Danish restored wetlands. *Ambio* **49**, 324–336.
- Bealey, W.J., Loubet, B., Braban, C.F., Famulari, D., Theobald, M.R., Reis, S., Reay, D.S., Sutton, M.A. 2014. Modelling agro-forestry scenarios for ammonia abatement in the landscape. *Environmental Research Letters* **9** (12), art. no. 125001
- Beaujouan, V., Durand, P., Ruiz, L. 2001. Modelling the effect of the spatial distribution of agricultural practices on nitrogen fluxes in rural catchments. *Ecological Modelling* **137**, 93–105.
- Bednarek, A., Szklarek, S., Zalewski, M. 2014. Nitrogen pollution removal from areas of intensive farming-comparison of various denitrification biotechnologies. *Ecology and Hydrobiology* **14** (2), 132–141.
- Benhamou, C, Salmon-Monviola, J, Durand, P, Grimaldi, C, Merot, P. 2013. Modeling the interaction between fields and a surrounding hedgerow network and its impact on water and nitrogen flows of a small watershed. *Agricultural Water Management* **121**, 62–72.
- Billen G, Garnier J, Lassaletta L (2013) The nitrogen cascade from agricultural soils to the sea: modelling nitrogen transfers at regional watershed and global scales. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **368** (1621), 20130123.
- Bittman S., Dedina, M., Howard, C.M., Oenema, O., Sutton, M.A (Eds.). 2014. *Options for Ammonia Mitigation. Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen*. Centre for Ecology and Hydrology, UK. (ISBN 978-1-906698-46-1).
- Butterbach-Bahl, K., Nemitz, E., Zaehle, S., Billen, B., Boeckx, P., Erisman, J.W., Garnier, J., Upstill-Goddard, R., Kreuzer, M., Oenema, O., Reis, S., Schaap, M., Simpson, D., de Vries, W., Winiwarter, W., Sutton, M.A. 2011. Effect of reactive nitrogen on the European greenhouse balance. Chapter 19 in: M.A. Sutton, C.M. Howard, J.W. Erisman, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, H. van Grinsven, B. Grizzetti (Eds.), *The European Nitrogen Assessment* (pp. 434–462). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Caballero-Lajarín, A., Zornoza, R., Faz, A., Lobera, J.B., Muñoz, M.A., Domínguez-Oliver, S.G. 2015. Combination of low-cost technologies for pig slurry purification under semiarid mediterranean conditions. *Water, Air, and Soil Pollution* **226**, 341. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2606-0>.
- Casal, L., Durand, P., Akkal-Corfini, N., Benhamou, C., Laurent, F., Salmon-Monviola, J., Vertès, F. 2019. Optimal location of set-aside areas to reduce nitrogen pollution: a modelling study. *Journal of Agricultural Science* **156**, 1090–1102.
- Cellier P, Durand P, Hutchings N, Dragosits U, Theobald M, Drouet JL, Oenema O, Bleeker A, Breuer L, Dalgaard T, Duret S, Kros H, Loubet B, Olesen JE, Mérot P, Viaud V, de Vries W and Sutton MA (2011) Nitrogen flows and fate in rural landscapes. Chapter 11 in: M.A. Sutton, C.M. Howard, J.W. Erisman, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, H. van Grinsven, B. Grizzetti (Eds.), *The European Nitrogen Assessment* (pp. 229–248). Cambridge University Press, Cambridge, UK.

- Clements, J.C., and Comeau, L.A. 2019. Nitrogen removal potential of shellfish aquaculture harvests in eastern Canada: A comparison of culture methods. *Aquaculture Reports* **13**, art. no. 100183.
- Dalgaard, T., Hutchings, N., Dragosits, U., Olesen, J.E., Kjeldsen, C., Drouet, J.L., Cellier P. 2011. Effects of farm heterogeneity and methods for upscaling on modelled nitrogen losses in agricultural landscapes. *Environmental Pollution* **159**, 3183–3192.
- Dalgaard, T., Bienkowski, J., Bleeker, A., Dragosits, U., Drouet, J.L., Durand, P., Frumau, A., Hutchings, N.J., Kedziora A., Magliulo E., Olesen J.E., Theobald M.R., Mauri O., Akkal N. and Cellier P. 2012. Farm nitrogen balances in European Landscapes. *Biogeosciences* **9**, 5303–5321.
- Dalgaard, T., Hansen, B., Hasler, B., Hertel, O., Hutchings, N., Jacobsen, B.H., Jensen, L.S., Kronvang, B., Olesen, J.E., Schjørring, J.K., Kristensen, I.S., Graversgaard, M., Termansen, M., Vejre H. 2014. Policies for agricultural nitrogen management - trends, challenges and prospects for improved efficiency in Denmark. *Environmental Research Letters* **9**, 115002. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/11/115002>.
- Dalgaard, T., Olesen, J.E., Misselbrook, T., Gourley, C., Mathias, E., Heldstab, J., Baklanov, A., Cordovil, C.M.d.S, Sutton, M. 2015. *Methane and Ammonia Air Pollution*. Policy Brief prepared by the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. May 2015. [http://www.clrtap-tfrn.org/sites/clrtap-tfrn.org/files/documents/NECDAmmoniaMethane\\_UN-TFRN2015\\_0513per cent20combi.pdf](http://www.clrtap-tfrn.org/sites/clrtap-tfrn.org/files/documents/NECDAmmoniaMethane_UN-TFRN2015_0513per cent20combi.pdf).
- Dalgaard, T., Brock, S., Børgesen, C.D., Graversgaard, M., Hansen, B., Hasler, B., Hertel, O., Hutchings, N.J., Jacobsen, B., Stoumann Jensen, L., Kjeldsen, C., Olesen, J.E., Schjørring, J.K., Sigsgaard, T., Andersen, P.S., Termansen, M., Vejre, H., Odgaard, M.V., de Vries, W., Wiborg, I. 2016. *Solution scenarios and the effect of top down versus bottom up N mitigation measures — Experiences from the Danish Nitrogen Assessment*. Feature Presentation for the International Nitrogen Initiative Conference INI2016, 4th — 8th December 2016, Melbourne, Australia.
- Davis, M.P., Martin, E.A., Moorman, T.B., Isenhardt, T.M., Soupir, M.L. 2019. Nitrous oxide and methane production from denitrifying woodchip bioreactors at three hydraulic residence times. *Journal of Environmental Management* **242**, 290–297.
- De La Mora-Orozco, C., González-Acuña, I.J., Saucedo-Terán, R.A., Flores-López, H.E., Rubio-Arias, H.O., Ochoa-Rivero, J.M. 2018. Removing organic matter and nutrients from pig farm wastewater with a constructed wetland system. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **15**, 1031.
- Dinsmore, K.J., Drewer, J., Levy, P.E., George, C., Lohila, A., Aurela, M., Skiba, U.M. 2017. Growing season CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from a sub-arctic landscape in northern Finland. *Biogeosciences* **14**, 799–815.
- Dragosits, U., Theobald, M. R., Place, C. J., ApSimon, H. M., and Sutton, M. A. 2006. The potential for spatial planning at the landscape level to mitigate the effects of atmospheric ammonia deposition. *Environmental Science and Policy* **9**, 626–638. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2006.07.002>.
- Drinkwater, L.E., Wagoner, P. Sarrantonio, M. 1998. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature* **396**, 262–265.
- Dumont, B., Dupraz, P., Sabatier, R., Donnars, C. 2017. A collective scientific assessment of the roles, impacts, and services associated with livestock production systems in Europe. *Fourrages* **229**, 63–76. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01604662>.
- Duret, S., Drouet, J.L., Durand, P., Hutchings, N.J., Theobald, M.R., Salmon-Monviola, J., Dragosits, U., Maury, O., Sutton, M.A., Cellier, P. 2011. NitroScape: a model to integrate nitrogen transfers and transformations in rural landscapes. *Environmental Pollution* **159**, 3162–3170.
- European Commission 2010. *Agriculture and Rural Development policy. Common monitoring and evaluation framework*. [https://ec.europa.eu/agriculture/rural-development-previous/2007-2013/monitoring-evaluation\\_en](https://ec.europa.eu/agriculture/rural-development-previous/2007-2013/monitoring-evaluation_en). Guidance document B, chapter I–4, pp. 35.

- European Commission (2019). *Recent studies commissioned by DG Environment to support implementation of the Nitrates Directive*. <https://ec.europa.eu/environment/water/water-nitrates/studies.html>.
- Eriksen, J., Nordemann Jensen, P., Jacobsen, B.H. 2014. *Virkemidler til realisering af 2. generations vandplaner og målrettet arealregulering*. DCA report no. 52. Danish Centre for Food and Agriculture, Aarhus University, Foulum, Denmark.
- Ford, H., Healey, J.R., Webb, B., Pagella, T.F., Smith, A.R. 2019. How do hedgerows influence soil organic carbon stock in livestock-grazed pasture? *Soil Use and Management* **35**, 576–584.
- Fowler, D., Pitcairn C.E.R., Sutton, M.A., Fléchar, C., Loubet, B., Coyle, M., MuNro, R.C. 1998. The mass budget of atmospheric ammonia in woodland within 1 km of livestock buildings. *Environmental Pollution* **102**, 343–348.
- Franqueville, D., Benhamou, C., Pasquier, C., Hénault, C., Drouet, J.L. 2018. Modelling reactive nitrogen fluxes and mitigation scenarios on a Central France landscape. *Agriculture Ecosystems and Environment* **264**, 99–110.
- Gabriel, J.L., Muñoz-Carpena, R., Quemada, M. 2012. The role of cover crops in irrigated systems: water balance, nitrate leaching and soil mineral nitrogen accumulation. *Agriculture Ecosystems and Environment* **155**, 50–61.
- Galloway, J.N., Aber, J.D., Erisman, J.W., Seitzinger, S.P., Howarth, R.W., Cowling, E.B., Cosby, B.J. 2003. The Nitrogen Cascade. *BioScience* **53**, 341–356.
- Garnier, J., Billen, G., Vilain, G., Benoit, M., Passy, P., Tallec, G., Tournebize, J., Anglade, J., Billy, C., Mercier, B., Ansart, P., Azougui, A., Sebil, M., Kao, C.(2014). Curative vs. preventive management of nitrogen transfers in rural areas: Lessons from the case of the Orgeval watershed (Seine River basin, France). *Journal of Environmental Management* **144**, 125–134.
- Garnier, J., Anglade, J., Benoit, M., Billen, G., Puech, T., Ramarson, A., Passy, P., Silvestre, M., Lassaletta, L., Trommenschlager, J.-M., Schott, C., Tallec, G. 2016. Reconnecting crop and cattle farming to reduce nitrogen losses to river water of an intensive agricultural catchment (Seine basin, France): past, present and future. *Environmental Science and Policy* **63**, 76–90.
- Garrett, R.D., Niles, M.T., Gil, J.D.B., Gaudin, A., Chaplin-Kramer, R., Assmann, A., Assmann, T.S., Brewer, K., de Faccio Carvalho, P.C., Cortner, O., Dynes, R., Garbach, K., Kebreab, E., Mueller, N., Peterson, C., Reis, J.C., Snow, V., Valentim, J. 2017. Social and ecological analysis of commercial integrated crop livestock systems: Current knowledge and remaining uncertainty. *Agricultural Systems* **155**, 136–146.
- Haddaway, N.R., Brown, C., Eales, J., Eggers, S., Josefsson, J., Kronvang, B., Randall, N.P., Uusi-Kämpä, J. 2018. The multifunctional roles of vegetated strips around and within agricultural fields. *Environmental Evidence* **7**, art. no. 14.
- Hashemi, F., Olesen, J.E., Børgesen, C.D., Tornbjerg, H., Thodsen, H., Dalgaard, T. 2018a. Potential benefits of farm scale measures versus landscape measures for reducing nitrate loads in a Danish catchment. *Science of the Total Environment* **637-638**, 318-335.
- Hashemi, F., Olesen, J.E., Hansen, A.L., Børgesen, C.D., Dalgaard, T. 2018b. Spatially differentiated strategies for reducing nitrate loads from agriculture in two Danish catchments. *Journal of Environmental Management* **208**, 77–91.
- Hill, A.R. 2019. Groundwater nitrate removal in riparian buffer zones: a review of research progress in the past 20 years. *Biogeochemistry* **143**, 347–369.
- Hinsby, K., Condesso de Melob, M.T., Dahl, M. 2008. European case studies supporting the derivation of natural background levels and groundwater threshold values for the protection of dependent ecosystems and human health. *Science of the Total Environment* **401** (1–3), 120.

- Holden, J., Grayson, R.P., Berdeni, D., Bird, S., Chapman, P.J., Edmondson, J.L., Firbank, L.G., Helgason, T., Hodson, M.E., Hunt, S.F.P., Jones, D.T., Lappage, M.G., Marshall-Harries, E., Nelson, M., Prendergast-Miller, M., Shaw, H., Wade, R.N., Leake, J.R. 2019. The role of hedgerows in soil functioning within agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **273**, 1–12.
- Højberg, A.L., Windolf, J., Børgesen, C.D., Troldborg, L., Tornbjerg, H., Blicher-Mathiesen, G., Kronvang, B., Thodsen, H., Ernsten, V. 2015. National N model (in Danish: National kvælstofmodel. Oplandsmodel til belastning og virkemidler. *Geological Survey of Denmark and Greenland*. ISBN 978-87-7871-417-6.
- Jacobsen, B.H., and Hansen, A.L. 2016. Economic gains from targeted measures related to nonpoint pollution in agriculture based on detailed nitrate reduction maps. *Science of the Total Environment* **556**, 264–275, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.103.
- Jensen, E.S., Carlsson, G., Hauggaard-Nielsen, H. 2020. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. *Agronomy for Sustainable Development* **40** (1), art. no. 5,
- Karyoti A., Bartzialis D., Sakellariou-Makrantonaki, M. Danalatos, N. 2018. Effects of irrigation and green manure on corn (*Zea mays* L.) biomass and grain yield. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* **18**, 820–832.
- Kellogg, M.L., Smyth, A.R., Luckenbach, M.W., Carmichael, R.H., Brown, B.L., Cornwell, J.C., Piehler, M.F., Owens, M.S., Dalrymple, D.J., Higgins, C.B. 2014. Use of oysters to mitigate eutrophication in coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **151**, 156–168.
- Kovář, P., Kovářová, M., Bunce, R., Ineson, P., Brabec, E. (1996) Role of hedgerows as nitrogen sink in agricultural landscape of Wensleydale, Northern England. *Preslia* **68**, 273–284.
- Lawson, G., Bealey, W.J., Dupraz, C., Skiba, U. 2020 (in press). Agroforestry and Opportunities for Improved Nitrogen Management. Chapter 27 in: M.A. Sutton, K.E. Mason, A. Bleeker, W.K. Hicks, C. Masso, S. Reis, M. Bekunda (Eds.), *Just Enough Nitrogen. Perspectives on how to get there for regions with too much or too little nitrogen*. Springer (in press).
- Leip, A., Billen, G., Garnier, J., Grizzetti, B., Lassaletta, L., Reis, S., Simpson, D., Sutton, M.A., de Vries, W., Weiss, F., Westhoek, H. 2015. Impacts of European livestock production: nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. *Environmental Research Letters* **10** (11), 115004.
- Li, C., Frolking, S., Butterbach-Bahl, K. 2005. Carbon sequestration can increase nitrous oxide emissions. *Climatic Change* **72**, 321–338.
- Liu, L., and Greaver, T.L. 2009. A review of nitrogen eNrichment effects on three biogenic GHGs: the CO<sub>2</sub> sink may be largely offset by stimulated N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emission. *Ecology Letters* **12**, 1103–1117.
- Lopez-Ponnada, E.V., Lynn, T.J., Peterson, M., Ergas, S.J., Mihelcic, J.R. 2017. Application of denitrifying wood chip bioreactors for management of residential non-point sources of nitrogen. *Journal of Biological Engineering* **11**, art. no. 16.
- Loubet, B., Cellier, P., Milford, C., Sutton, M.A. 2006. A coupled dispersion and exchange model for short-range dry deposition of atmospheric ammonia. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **132**, 1733–1763.
- Lukin, S.M., Nikolskiy, K.S., Ryabkov, V.V., Rysakova, I.V. 2014. Methods to reduce ammonia nitrogen losses during production and application of organic fertilizers. In: *Ammonia workshop 2012 Saint Petersburg. Abating ammonia emissions in the UNECE and EECCA region*. pp. 169–175.

- Luo, P., Liu, F., Zhang, S., Li, H., Yao, R., Jiang, Q., Wu, J. 2018. Nitrogen removal and recovery from lagoon-pretreated swine wastewater by constructed wetlands under sustainable plant harvesting management. *Bioresource Technology* **258**, 247–254. doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.017.
- Montoya, D., Gaba, S., de Mazancourt, C., Bretagnolle, V., Loreau, M. 2020. Reconciling biodiversity conservation, food production and farmers' demand in agricultural landscapes. *Ecological Modelling* **416**, art. no. 10888.
- Mosier, A., Kroeze, C., Nevison, C., Oenema, O., Seitzinger, S., van Cleemput, O. 1998. Closing the global N<sub>2</sub>O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **52** (2–3), 225–248.
- Muñoz, M.A., Rosales, R.M., Gabarrón, M., Acosta, J.A. 2016. Effects of the Hydraulic Retention Time on Pig Slurry Purification by Constructed Wetlands and Stabilization Ponds. *Water, Air, and Soil Pollution* **227**, art. No. 293. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2993-x>.
- Nguyen, T.H., Nong, D., Paustian, K. 2019. Surrogate-based multi-objective optimization of management options for agricultural landscapes using artificial neural networks. *Ecological Modelling* **400**, 1–13.
- Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., Mimikou, M. 2013. Multi-objective optimization for diffuse pollution control at zero cost. *Soil Use and Management* **29**, 83–93.
- Pavlidis, G., Tsihrintzis, V.A. 2018. Environmental benefits and control of pollution to surface water and groundwater by agroforestry systems: a review. *Water Resources Management* **32**, 1–29.
- Pilegaard, K., Skiba, U., Ambus, P., Beier, C., Brüeggemann, N., Butterbach-Bahl, K., Dick, J., Dorsey, J., Duyzer, J., Gallagher, M., Gasche, R., Horvath, L., Kitzler, B., Leip, A., Pihlatie, M., Rosenkranz, P., Seufert, G., Vesala, T., Westrate, H., Zechmeister-Boltenstern, S. 2006. Factors controlling regional differences in forest soil emission of nitrogen oxides (NO and N<sub>2</sub>O). *Biogeosciences* **3**, 651–661.
- Pitcairn, C. E. R., Fowler, D., Leith, I.D., Sheppard, L.J., Sutton, M.A., Kennedy, V., Okello, E. 2003. Bioindicators of enhanced nitrogen deposition. *Environmental Pollution* **126** (3), 353–361.
- Poach, M. E., Hunt, P. G., Vanotti, M. B., Stone, K. C., Matheny, T. A., Johnson, M. H., Sadler, E. J. 2003. Improved nitrogen treatment by constructed wetlands receiving partially nitrified liquid swine manure. *Ecological Engineering* **20**, 183–197. doi.org/10.1016/S0925-8574(03)00024-7.
- Quemada M., Lassaletta L., Leip A., Jones A., Lugato E. 2020. Integrated management for sustainable cropping systems: looking beyond the greenhouse balance at the field scale. *Global Change Biology* **26**, 2584–2598.
- Ren, L., Eller, F., Lambertini, C., Guo, W.-Y., Brix, H., Sorrell, B.K. 2019. Assessing nutrient responses and biomass quality for selection of appropriate paludiculture crops. *Science of the Total Environment* **664**, 1150–1161.
- Salazar, O., Balboa, L., Peralta, K., Rossi, M., Casanova, M., Tapia, Y., Singh, R., Quemada, M. 2019. Leaching of dissolved organic nitrogen and carbon in a maize-cover crops rotation in soils from Mediterranean central Chile. *Agricultural Water Management* **212**, 399–406.
- Sanz-Cobena, A., García-Marco, S., Quemada, M., Gabriel, J.L., Almendros, P., Vallejo, A. 2014. Do cover crops enhance N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> or CH<sub>4</sub> emissions? *Science of the Total Environment* **466–467**, 164–174.
- Skiba, U., Dick, J., Storeton-West, R., Lopez-Fernandez, S., Woods, C., Tang, S., van Dijk, N. 2006. The relationship between NH<sub>3</sub> emissions from a poultry farm and soil NO and N<sub>2</sub>O fluxes from a downwind forest. *Biogeosciences* **3**, 375–382.
- Sutar, R.S., Lekshmi, B., Kamble, K.A., Asolekar, S.R. 2018. Rate constants for the removal of pollutants in wetlands: A mini review. *Desalination and Water Treatment* **122**, 50–56.

- Sutton, M.A. and others (2013). *Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution*. Global Overview of Nutrient Management (Edinburgh, Centre of Ecology and Hydrology).
- Sutton, M.A., Dragosits, U., Theobald, M.R., McDonald, A.G., Nemitz, E., Blyth, J.F., Sneath, R., Williams, A., Hall, J., Bealey, W.J., Smith, R.I., Fowler D. (2004) The role of trees in landscape planning to reduce the impacts of atmospheric ammonia deposition. In: R. Smithers (Ed.) *Landscape ecology of trees and forests*, pp. 143–150. IALE (UK) / Woodland Trust, Grantham.
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., Grinsven, H. and Grizzetti, B. (Eds.). 2011. *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 612 pp.
- Sutton, M., Raghuram, N., Adhya, T.K., Baron, J., Cox, C., de Vries, W., Hicks, K., Howard, C., Ju, X., Kanter, D., Masso, C., Ometto, J.P., Ramachandran R., van Grinsven, H., Winiwarter, W. 2019. The Nitrogen Fix: From nitrogen cycle pollution to nitrogen circular economy. *Frontiers 2018/2019: Emerging Issues of Environmental Concern*. pp. 52–65, United Nations Environment Programme, Nairobi.
- Tian, L., Cai, H., Akiyama, A. 2019. Review of indirect N<sub>2</sub>O emission factors from agricultural nitrogen leaching and run-off to update of the default IPCC values. *Environmental Pollution* **245**, 300–306.
- Terrero, M. A., Muñoz, M. Á., Faz, Á., Gómez-López, M. D., Acosta, J. A. 2020. Efficiency of an integrated purification system for pig slurry treatment under mediterranean climate. *Agronomy* **10** (2), 208. doi.org/10.3390/agronomy10020208.
- Theobald, M.R., Bealey, W.J., Tang, Y.S., Vallejo, A., Sutton, M.A. 2009. A simple model for screening the local impacts of atmospheric ammonia. *Science of the Total Environment*. **407** (23), 6024–6033.
- Theobald, M.R., Dragosits, U., Place, C.J., Smith, J.U., Sozanska, M., Brown, L., Scholefield, D., del Prado, A., Webb, J., Whitehead, P.G., Angus, A., Hodge, I.D., Fowler, D., Sutton M.A. 2004. Modelling nitrogen fluxes at the landscape scale. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* **4** (6), 135–142.
- Theobald, M.R., Milford, C., Hargreaves, K.J., Sheppard, L.J., Nemitz, E., Tang, Y.S., Phillips, V.R., Sneath, R., McCartney, L., Harvey, F.J., Leith, I.D., Cape, J.N., Fowler, D., Sutton, M.A. 2001. Potential for ammonia recapture by farm woodlands: design and application of a new experimental facility. *TheScientificWorldJournal* **1**, 791–801.
- Tribouillois, H., Cohan, J. P., Justes, E. 2015. Cover crop mixtures including legume produce ecosystem services of nitrate capture and green manuring: assessment combining experimentation and modelling. *Plant and Soil* **401**, 347–364, doi:10.1007/s11104-015-2734-8 (2016).
- Thomas, Z., and Abbott, B.W. 2018. Hedgerows reduce nitrate flux at hillslope and catchment scales via root uptake and secondary effects. *Journal of Contaminant Hydrology* **215**, 51–61.
- Todman, L.C., Coleman, K., Milne, A.E., Gil, J.D.B., Reidsma, P., Schwoob, M.-H., Treyer, S., Whitmore, A.P. 2019. Multi-objective optimization as a tool to identify possibilities for future agricultural landscapes. *Science of the Total Environment* **687**, 535–545.
- Valkama, E., Usva, K., Saarinen, M., Uusi-Kämpä, J. 2019. A meta-analysis on nitrogen retention by buffer zones. *Journal of Environmental Quality* **48**, 270–279.
- Viaud, V., Durand, P., Merot, P., Sauboua, E., Saadi, Z. 2005. Modeling the impact of the spatial structure of a hedge network on the hydrology of a small catchment in a temperate climate. *Agricultural Water Management* **74**, 135–163.
- Voisin, A.-S., Guéguen, J., Huyghe, C., Jeuffroy, M.-H., Magrini, M.-B., Meynard, J.-M., Mougél, C., Pellerin, S., Pelzer, E. 2014. Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: A review. *Agronomy for Sustainable Development* **34** (2), 361–380.

- Vymazal, M. 2017. The use of constructed wetlands for nitrogen removal from agricultural drainage: a review. *Scientia Agriculturae Bohemica* **48**, 82–91.
- Wagner-Riddle, C., Congreves, K.A., Abalos, D., Berg, A.A., Brown, S.E., Ambadan, J.T., Gao, X., Tenuta, M. 2017. Globally important nitrous oxide emissions from croplands induced by freeze-thaw cycles. *Nature Geosciences* **10**, 279–283.
- Wilkins, R.J. 2008. Eco-efficient approaches to land management: a case for increased integration of crop and animal production systems. *Phil. Trans Royal Society B* **363**, 517–525.
- Wu, S., Lei, M., Lu, Q., Guo, L., Dong, R. 2016. Treatment of pig manure liquid digestate in horizontal flow constructed wetlands: Effect of aeration. *Engineering in Life Sciences* **16**, 263–271.
- Xia, L., Lam, S.K., Wolf, B., Kiese, R., Chen, D., Butterbach-Bahl, K. 2018. Trade-offs between soil carbon sequestration and reactive nitrogen losses under straw return in global agroecosystems. *Global Change Biology* **12**, 5919–5932.

## VII. Разработка пакетов мер по комплексному устойчивому управлению азотом

### A. Введение

466. Содержащийся в настоящем руководящем документе материал служит основой для улучшения понимания связей в рамках азотного (N) цикла, а также предлагает набор возможных вариантов действий. Осмысление перечисленных принципов (глава III) может помочь выработке национальных и региональных подходов, основанных на понимании ключевых вопросов. В совокупности описания мер для различных этапов цикла (главы IV–VI) указывают на преимущества и недостатки этих мер.

467. Хотя анализ общего потока азота через агропродовольственную систему является ключевым элементом выстраивания целостной картины, необходимо также более полно представлять существующие связи. Поэтому в настоящей главе рассматриваются отдельные примеры, иллюстрирующие возможные «пакеты мер». Речь идет о пакетах согласованных мер, зависящих от специфики местности, системы земледелия и экологических условий. Эти примеры могут помочь правительствам, официальным учреждениям, деловым кругам и местным группам общественности в рассмотрении вопроса о том, как совместить различные меры и принципы.

468. В основе этого подхода лежит рассмотрение потока азота в контексте азотного цикла. Использование азота в удобрениях и кормах напрямую связано с накоплением азота в продовольственных культурах и продукции животноводства, а также с расточительными потерями азота, выбрасываемого в окружающую среду. Это означает, что решения, принимаемые всеми заинтересованными сторонами, влияют на эффективность системы, объем потерь азота и уровни загрязнения. Поэтому для получения максимальной выгоды за счет мер, принимаемых на более ранних этапах азотной цепочки, должны следовать дополнительные меры на более поздних этапах. Например, для того чтобы уже достигнутые результаты не были сведены на нет, меры по сокращению выбросов  $\text{NH}_3$  в процессе содержания скота должны дополняться организацией хранения навоза и его внесения в почву.

469. Если взглянуть на различные меры, перечисленные в главах IV–VI, сразу становится ясно, что они дополняют друг друга, затрагивая различные звенья системы. Это означает, что в рамках комплексного устойчивого управления азотом крайне важно рассматривать «пакеты мер» как для получения синергического эффекта, так и для сведения к минимуму необходимости искать компромиссные решения.

470. Следующие примеры иллюстрируют, почему необходимы пакеты мер:

a) выбросы аммиака, как правило, происходят быстро (в течение нескольких часов или дней), поэтому меры по сведению к минимуму контакта богатых аммиаком ресурсов с воздухом имеют важное значение (принцип 15);

b) меры, снижающие крупные потери азота (например,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{NH}_3$ ), оставляют больше азота в системе земледелия. Поэтому для раскрытия всего потенциала мер по повышению эффективности использования азота (ЭИА) и уменьшению потерь азота важно сокращать дополнительные поступления  $\text{N}_r$  (или увеличивать его генерирование/хранение) (принцип 6);

c) выбросы  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$  и  $\text{N}_2$  в воздух и вымывание  $\text{NO}_3^-$  и других соединений  $\text{N}_r$ , как правило, происходят вследствие избытка аммония и нитратов в почве, где они превышают потребности растений. Поэтому сокращение этих выбросов требует знания количества и времени поглощения азота растениями (принцип 7) во избежание накопления излишков азота в почве;

d) различия в процессах регулирования потерь окисленного  $\text{N}_r$  ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) и выбросов  $\text{NH}_3$  означают, что меры для первой группы не всегда подходят для второй (и наоборот). Поэтому меры должны рассматриваться в совокупности;

e) согласно балансу массы, все меры, позволяющие соответствующим образом сократить общий объем поступления  $N_r$  при сохранении производительности, повышают ЭИА в масштабах всей системы и ведут к сокращению суммарных потерь  $N_r$  (принцип 7);

f) более широкие стратегии землепользования и управления ландшафтом дополняют стратегии борьбы с загрязнением окружающей среды животными и сельскохозяйственными культурами, предоставляя возможность повысить устойчивость ландшафта и смягчая экологические последствия путем управления процессами распределения во времени и в пространстве (принципы 11 и 15). Это означает, что меры, связанные с землепользованием/ландшафтом, особенно актуальны для снижения местного негативного воздействия (например, воздействия на природу и воду).

471. Дальнейшие вопросы такого рода подробно рассматриваются в главе III. Приведенные здесь примеры показывают, как подобный подход может быть применен для разработки согласованных пакетов мер. Основное внимание уделяется примерам из области сельского хозяйства, хотя эта философия актуальна для всех сырьевых секторов.

## **В. Практические примеры**

### **Пример 1: пакет мер для интенсивно управляемой молочной фермы**

472. Интенсивное молочное производство, как правило, предполагает как стойловое, так и выпасное содержание скота в течение части года. Это означает, что при принятии мер должны учитываться обе системы. В данном примере применяется широкий подход, цель которого состоит в том, чтобы продемонстрировать пакет мер, направленных на:

a) сокращение общих потерь азота для максимального сохранения  $N_r$  в сельскохозяйственной системе и уменьшение потерь в результате денитрификации до  $N_2$ , что сулит также финансовые выгоды благодаря уменьшению потребности во внесении промышленных удобрений;

b) сокращение в приоритетном порядке выбросов  $NH_3$ , учитывая близость к определенным охраняемым природным средам обитания;

c) применение в соответствии с основополагающими национальными руководящими принципами передовой практики, с тем чтобы свести к минимуму вымывание нитратов и избежать азотного загрязнения водотоков;

d) сокращение выбросов  $N_2O$  и  $NO_x$ , если это согласуется с другими мерами.

473. Контекстом для данного примера служит сельская страна с низким уровнем выбросов  $NO_x$  автотранспортными средствами, но с высокой концентрацией тропосферного озона, вследствие чего любое снижение содержания  $NO_x$  в почве будет считаться важным достижением. Страна имеет мягкий климат, что позволяет увеличить пастбищный сезон по сравнению с его нынешней продолжительностью. Непроницаемость почв снижает риск вымывания  $NO_3^-$ , но повышает риск поверхностного стока в уязвимые водотоки. Фермерские постройки имеют естественную вентиляцию, скот содержится на щелевом полу над жижеборником. Возможность инвестирования средств в существенное изменение конструкции строений отсутствует, хотя точечные изменения возможны. Скот в основном питается травой, и хозяйство не располагает обширными пахотными площадями. В настоящее время навоз разбрасывается на лугопастбищных угодьях с помощью традиционного вакуумного разбрасывателя (пластинчатого разбрызгивателя).

474. Что касается потоков азота на пастбищах, заслуживают внимания следующие вопросы:

а) поскольку воздействие аммиака имеет значение, очевидным способом сокращения выбросов  $\text{NH}_3$  представляется увеличение пастбищного сезона (полевая мера 18). Однако потребуются специальные меры для того, чтобы это не привело к увеличению горизонтального стока азота в близлежащие водотоки. Этого можно добиться, используя такие особенности ландшафта, как лесистые буферные зоны (Управление ландшафтом — мера 10);

б) хотя непроницаемость почвы в данном конкретном примере означает, что вымывание нитратов в грунтовые воды, возможно, и не является приоритетом, этот тип почвы также подвержен повышенной денитрификации, растрачиванию ресурсов  $\text{N}_r$  в виде  $\text{N}_2$  и повышенным выбросам  $\text{N}_2\text{O}$ ;

в) при сильных зимних осадках плохой дренаж на непроницаемых почвах грозит вытаптыванием пастбищ скотом — трава уничтожается, а поля покрываются слоем грязи. Такое вытаптывание снижает потребление питательных веществ растениями и может привести к увеличению выбросов  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ . В данном примере это может стать одним из важнейших факторов, мешающих увеличению продолжительности пастбищного сезона.

475. С учетом этих соображений в данном примере можно предложить следующий пакет возможных мер для смягчения последствий выбросов:

а) увеличение времени выпаса животных (полевая мера 18), например, путем продления пастбищного сезона на одну–две недели вначале и в конце, признавая при этом необходимость поддержания почвы и травяного покрова в хорошем состоянии и использования подходящих методов выпаса. Это может способствовать сокращению общих выбросов  $\text{NH}_3$  хозяйством;

б) обеспечение здорового развития травяного покрова и предотвращение его вытаптывания путем активного управления стадом через пастбищеоборот. Это сводит к минимуму риск того, что излишки азота не будут поглощены растениями, способствуя снижению потерь  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ . Это также помогает снизить вымывание нитратов, если таковое имеет место;

в) установка ограждений, с тем чтобы выпас скота происходил на рекомендуемом удалении от водотоков (полевая мера 19), а также возможное использование растительности в буферных зонах вблизи ручьев (Управление ландшафтом — мера 11). Это может способствовать уменьшению стока  $\text{N}_r$  в водотоки;

г) сотрудничество с местными учеными в тестировании применения ингибиторов нитрификации в местах обильного попадания мочи в почву (полевая мера 20) (например, с помощью беспилотников или в рамках управления пастбищеоборотом).

476. В связи с выбросами, вызванными стойловым содержанием скота и использованием навоза, заслуживают рассмотрения следующие вопросы:

а) рацион питания каждой группы животных в зимний период стойлового содержания должен быть проанализирован на предмет возможности оптимизации общего смешанного рациона с учетом потребностей в белке, поскольку сведение к минимуму ненужных излишков позволит сократить потери азота (пищевая мера 1);

б) существующая система целевого пола не очень хорошо подходит для немедленного разделения мочи и фекалий (стойловая мера 1). Исходя из реально доступного в данном примере финансирования, существенная перепланировка помещения не представляется возможной;

в) при наличии целевого финансирования возможны дополнительные меры, не требующие серьезной реконструкции животноводческого помещения;

г) жидкий навоз (навозная жижа) в настоящее время хранится в открытом резервуаре, что может привести к значительным выбросам  $\text{NH}_3$ .

477. С учетом этих соображений возможный пакет мер по сокращению выбросов азота в процессе стойлового содержания животных и использования навоза мог бы состоять в следующем:

а) таргетирование содержания белка в корме крупного рогатого скота в соответствии с нормативом, составляющим, например, в среднем 15–16 % сырого белка для молочных коров. Следует изучить возможность поэтапного кормления в соответствии с возрастом животных в случае сезонного отела или содержания по возрастным группам в целях повышения точности кормления и полного удовлетворения энергетических потребностей. Следует начать регулярное тестирование фуражного компонента рациона (например, заготовленного хозяйством силоса) в том виде, в котором он используется, с тем чтобы способствовать достижению целевого уровня потребления сырого протеина (Кормление животных — мера 1);

б) изучение возможности выделения субсидий на строительство помещений для содержания скота, мощностей для хранения и внесения навоза, которые демонстрировали бы низкий уровень выбросов, уделяя первоочередное внимание хозяйствам, расположенным вблизи охраняемой природной среды обитания, чувствительной к аммиаку;

в) установка автоматизированной системы мытья полов в животноводческих помещениях (дважды в день) (Содержание животных — мера 3);

г) установка системы подкисления навозной жижи в навозной яме (стойловая мера 7). Эта система позволит снизить выбросы  $\text{NH}_3$  из самого помещения, а также обеспечит дополнительные преимущества в виде сокращения выбросов при хранении и внесении навоза;

д) модернизация вакуумного разбрасывателя за счет его оснащения буксируемым шлангом или системой волоочильного башмака (полевая мера 6). В дополнение к выгоде от подкисления навозной жижи это позволит еще больше сократить выбросы  $\text{NH}_3$ , а также обеспечит точное внесение навоза и обеспечение его бесперебойной доставки к растениям (и удобрение сельскохозяйственных культур), максимально ограничивая внесение навозной жижи вблизи мест с уязвимой средой обитания (управление ландшафтом — мера 16). Для согласования минимальных расстояний между внесением навозной жижи и чувствительными природными зонами может потребоваться проведение консультаций с природоохранными организациями и использование онлайн-моделей (например, <http://www.scail.ceh.ac.uk>).

478. Общий пакет полевых мер и мер в области содержания животных должен анализироваться применительно к местным целям по сбережению азота, сокращению выбросов различных форм  $\text{N}_r$  и защите экосистемы. Наличие комплексного плана рационального использования питательных веществ (полевая мера 1), основанного на данных анализа почвы на их содержание, в сочетании с утвержденными мерами по снижению выбросов поможет сократить объемы внесения в почву промышленных удобрений, с тем чтобы сэкономить средства и получить выгоду от сокращения выбросов (принцип 6). Мониторинг баланса азота на уровне отдельных хозяйств может оказаться полезным индикатором для оценки того, насколько быстро можно сократить объем закупаемых азотных удобрений в рамках усилий по повышению ЭИА на уровне хозяйств и сокращению излишков азота. Если ставятся более масштабные задачи (например, устройство покрытия навозохранилища, устройство твердых полов для содержания животных и обменников), могут быть предусмотрены и дополнительные меры.

### **Пример 2: пакет мер для хозяйства, производящего биомолоко**

479. Следует проанализировать, как предыдущий пример может измениться, если речь идет о ферме, производящей биомолоко и расположенной в том же месте. Следует обратить внимание на следующие общие моменты:

а) предполагается, что экологические цели рационального использования азота являются такими же, как и в предыдущем примере. Основные отличия

закключаются в том, что в этом случае не применяются синтезированные неорганические удобрения и что для подкисления навозной жижи не будут закупаться сильнодействующие кислоты (например, серная кислота);

b) в этом хозяйстве, выпускающем органическую продукцию, источником азота служат богатые клевером травы, которые обеспечивают достаточно богатый белками рацион для кормления крупного рогатого скота в период зимнего стойлового содержания. Предварительные расчеты для этого примера показывают, что производство остается сравнительно интенсивным с высокими надоями молока, хотя поступления азота на 30 % ниже, чем в первом примере, а общий избыток азота вдвое ниже, хотя эти расчеты необходимо перепроверить;

c) поскольку животноводческое хозяйство продуцирует жидкий навоз (навозную жижу), выбросы  $\text{NH}_3$  из мест содержания скота остаются значительными, в том числе из открытого хранилища навоза и в результате поверхностного разбрызгивания навозной жижи на окружающих луговых угодьях. Выбросы аммиака этим производящим органическую продукцию хозяйством, а также с полей по-прежнему представляют значительный риск для прилегающих охраняемых природных сред обитания;

d) хотя неорганические удобрения в хозяйстве не используются, его деятельность ведет к значительным выбросам  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$  и  $\text{N}_2$ , особенно после применения жидкого навоза на полях. Сток нитратов и других форм  $\text{N}_r$  также является проблемой, вызывающей беспокойство;

e) поскольку это производящее органическую продукцию хозяйство не пользуется покупными источниками азота, у него есть мощные стимулы сокращать потери азота, чтобы получить максимальную выгоду от ограниченных ресурсов азота, которыми оно располагает.

480. Все меры, описанные в первом примере, остаются актуальными за исключением следующих:

a) подкисление навозной жижи (Содержание животных — мера 7);

b) применение (химических) ингибиторов нитрификации во время выпаса (полевая мера 20).

481. Применительно к выбросам в результате содержания животных и операций с навозом следует рассмотреть возможность реализации указанных ниже мер:

a) увеличение продолжительности выпасного периода (полевая мера 18) — как и в первом примере;

b) оборот пастбищ во избежание вытаптывания — как и в первом примере;

c) отказ от выпаса скота на чувствительных участках вблизи водотоков (полевая мера 19) и определение буферных зон (Управление ландшафтом — мера 10) — как и в первом примере;

d) сотрудничество с местными учеными в тестировании применения ингибиторов нитрификации в местах обильного попадания мочи в почву (полевая мера 20) — как и в первом примере, — причем тестироваться должны ингибиторы нитрификации органического происхождения, например масло семян дерева Ним;

e) тестирование возможностей тонкой адаптации рациона питания с учетом потребностей в протеине, ориентируясь на целевые показатели содержания сырого протеина, и рассмотрение возможности фазового кормления (пищевая мера 1) — как и в первом примере;

f) изучение возможности выделения субсидий на строительство помещений для содержания скота, мощностей для хранения и внесения навоза, которые имели бы низкий уровень выбросов, уделяя при этом первоочередное внимание хозяйствам, расположенным вблизи охраняемой природной среды обитания — как и в первом примере, — однако возможности для получения грантов

во втором примере могут быть более широкими, учитывая стремление хозяйства производить органическую продукцию;

g) установка автоматизированной системы мытья полов в животноводческих помещениях (Содержание животных — мера 3) — как и в первом примере;

h) в сотрудничестве с учеными опробовать систему капельных биофильтров для улавливания и рекуперации  $\text{NH}_3$  из навозной ямы как источника органического азота (см. содержание животных — меры 7 и 15), что позволяет сократить выбросы в процессе стойлового содержания скота и хранения навоза;

i) изучение недорогих вариантов укрытия навозной жижи, хранящейся вне помещения для содержания животных. Следует проанализировать достаточность образования естественной корки (навозная мера 2) или возможность хранения навоза под твердым покрытием (навозная мера 1);

j) модернизация вакуумного разбрасывателя за счет его оснащения волоочильного башмака (полевая мера 6) — как в первом примере, — но обеспечивающей более существенное сокращение выбросов, чем буксируемый шланг, и более пригодной для пастбищных угодий. Это особенно важно, поскольку в примере с органическим сельскохозяйственным производством подкисляющее вещество не применяется;

к) сведение к минимуму внесения навозной жижи вблизи уязвимых сред обитания (Управление ландшафтом — мера 16) — как в первом примере.

482. Как и в первом примере, общий пакет мер должен анализироваться применительно к местным целям по сбережению азота, сокращению выбросов различных форм  $\text{N}_r$  и защите экосистемы. Наличие комплексного плана рационального использования питательных веществ (полевая мера 1), основанного на данных анализа почвы на их содержание, имеет особенно важное значение для максимального эффективного использования ограниченных ресурсов азота, а также для получения выгоды от его сбережения за счет сокращения выбросов (Принцип 6). Если ставятся более амбициозные задачи, могут быть предусмотрены и дополнительные меры (например: полевая мера 7 — внутрпочвенное внесение жидкого навоза; навозная мера 8 — местное подкисление навоза и обогащение азотом, усиленное ветровой/солнечной энергией).

### **Пример 3: Пакет мер по производству средиземноморских томатов обыкновенных**

483. Производство томатов обыкновенных (*Lycopersicon esculentum* L) является одним из важнейших видов сельскохозяйственной деятельности в Средиземноморском регионе (четыре средиземноморские страны входят в десятку крупнейших производителей в мире). Эта многолетняя культура выращивается ежегодно путем пересадки в начале весны саженцев, которые растут до конца лета. Это приводит к появлению поверхностной и разветвленной корневой системы, требующей интенсивного орошения и удобрения, особенно азотом. В основе пакета мер, проиллюстрированного в данном примере, лежит широкий подход со следующими целями:

a) сокращение общих потерь азота для максимального удержания азота в системе сельскохозяйственного производства, с акцентом, в частности, на снижение потерь от вымывания  $\text{NO}_3^-$  из почв на территориях, расположенных в уязвимых районах водосбора;

b) сокращение потерь азота при поверхностном стоке в уязвимые водотоки, учитывая, что полив в основном осуществляется капельными системами поверхностного орошения;

c) сокращение выбросов  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{NO}_x$  в почву, которые могут быть значительными из-за наличия воды и высоких температур. Эти потери азота также

связаны с глубокой обработкой почвы, необходимой для ее подготовки к пересадке томатов;

d) сокращение и предотвращение возможного увеличения выбросов  $\text{NH}_3$  (если в будущем рынки будут отдавать все большее предпочтение удобрениям на основе мочевины);

e) сокращение общего объема и стоимости закупаемых удобрений.

484. Контекст производства томатов в данном примере — это сельская местность, где движение почвы полностью ограничено сельскохозяйственным транспортом. Выбросов  $\text{NO}_x$  транспортными средствами в рассматриваемом примере мало. Это означает, что снижение  $\text{NO}_x$  в почве будет считаться существенным шагом в сторону повышения качества воздуха. В настоящее время навоз, как правило, не используется в этой производственной системе. Акцент в ней сделан на получении азота и других питательных веществ за счет внесения промышленных неорганических удобрений. В рассматриваемом примере в формулах используемых на сегодняшний день удобрений преобладают аммиачная селитра, дополняемая другими питательными веществами. Для основного внесения чаще всего используются содержащие мочевину комбинированные удобрения. За ними следуют различные растворимые соединения, используемые в удобрительном орошении, в том числе раствор мочевины. Касательно потоков азота, связанных с производством томатов обыкновенных, следует обратить внимание на следующие вопросы:

a) наибольший риск потерь азота связан с вымыванием нитратов в грунтовые воды в связи с большими потребностями в орошении этой культуры в средиземноморском климате. Так как современная практика орошения в основном заключается в орошении поверхности почвы, существует также потенциальная возможность потерь в результате стока. Для того чтобы орошение не усиливало вымывание N или поверхностный сток, необходимы надлежащая ирригационная система и рациональное использование водных ресурсов;

b) поскольку в данном примере хозяйства расположены в уязвимых районах, существующие типы почв благоприятствуют вымыванию нитратов в грунтовые воды, что делает борьбу с этим видом потерь приоритетом;

c) поскольку томаты обыкновенные очень требовательны к азотным удобрениям, фермеры часто вносят больше азотных удобрений, чем это реально требуется для данной культуры. Помимо внесения азота и других питательных веществ в качестве основных удобрений, томатные поля уже получают удобрительное орошение (например, удобрения добавляются в воду для орошения, полевая мера 16). Объемы азота, дополнительно вносимого при удобрительном орошении, в настоящее время различаются в зависимости от цикла роста сельскохозяйственных культур, однако отсутствие калибровки с учетом фактической урожайности культур повышает риск потерь азота, поскольку фермеры в рамках управления рисками, как правило, вносят больше азота, чем необходимо (например, в случае неблагоприятных погодных условий или потерь азота);

d) перед высадкой рассады томатов почва проходит существенную обработку — глубокую пропашку и несколько циклов последующей механической обработки. Это увеличивает выбросы  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{NO}_x$  из почвы, а также в результате сжигания топлива сельскохозяйственной техникой. Повышенная минерализация почвенного органического вещества (ПОВ) в результате пропашки приводит к увеличению выбросов  $\text{NH}_3$  в переменных объемах, хотя точные величины потерь неизвестны. Значительные потери азота вследствие денитрификации до  $\text{N}_2$  ожидаются, но пока не получили четкой количественной оценки.

485. С учетом этих соображений возможный пакет мер по сокращению выбросов с полей в связи с производством томатов обыкновенных мог бы включать следующие меры:

a) установка более точных систем орошения, совместимых с рациональными агротехническими методами. Это может способствовать снижению

общих потерь азота с полей, в том числе вследствие вымывания и поверхностного стока (принцип 16);

b) внедрение более эффективных систем управления водными ресурсами (принцип 20). Это также способствует максимальному росту растений и производству томатов, увеличивая поглощение азота растениями, что в свою очередь помогает уменьшить общие потери азота (особенно вымывание азота);

c) признание различных потребностей в орошении растений томатов в течение вегетационного цикла в соответствии с реальными условиями по мере их развития. Для этого требуется, чтобы полив был регулируемым, а также внесение дополнительного азота посредством удобрительного орошения, исходя из актуализируемых расчетных потребностей культур. Это также может помочь в экономии воды, а также в сбережении азота и других питательных веществ. Эта мера может подкрепляться компьютерными оценками, обновляемыми в режиме реального времени на основе метеорологических данных и мониторинга показателей роста сельскохозяйственных культур;

d) обеспечение надлежащего укрытия почвы непроницаемой пленкой для снижения потерь воды при испарении. Эта мера может способствовать сокращению потребностей в воде для полива и, следовательно, уменьшению попадания  $N_f$  в поверхностные и грунтовые воды. При использовании черной пленки рост сорняков будет сведен к минимуму, что также поможет избежать использования пестицидов. Следует уделять внимание повторному использованию и утилизации пленки;

e) более точный расчет объемов азота, добавляемого в ходе внесения основных удобрений и удобрительного орошения, во избежание чрезмерного содержания питательных веществ (включая азот), исходя из результатов анализа концентрации питательных веществ в почве и состояния культур (например, мониторинг цвета листьев). В зависимости от того, насколько чрезмерным является применение удобрений в современной практике, это может значительно сократить вымывание нитратов и другие выбросы азота (принцип 5; полевые меры 2, 3, 4 и 16). Использование электронных инструментов для расчета возможной экономии средств за счет более точного внесения азота в соответствии с потребностями может помочь добиться изменений;

f) снижение интенсивности обработки почвы при подготовке к высаживанию томатов может также способствовать уменьшению выбросов азота от сжигания топлива, и из самой почвы. Альтернативные решения включают в себя высадку саженцев в мульчированную не вспаханную почву для снижения роста сорняков, а также необходимости использования пленки и обработки почвы;

g) организация информационной кампании для фермеров в области, о которой идет речь в примере, с тем чтобы обратить их внимание на риски неограниченного использования мочевины с точки зрения выбросов  $NH_3$ . Это должно повысить осведомленность фермеров о вероятных выбросах азота в результате внесения удобрений на основе мочевины, экономической цене потерь азота и последствиях для окружающей среды. Эта осведомленность может затем облегчить принятие дополнительных мер (например, использование ингибитора уреазы, полевая мера 13).

486. Этот перечень полевых мер следует рассматривать в связи с местными условиями и местными целями по сбережению азота, сокращению выбросов  $N_f$  в различных формах, охране здоровья человека и экосистем. Использование плана рационального использования питательных веществ, подкрепляемого анализом почвы, должно способствовать более оптимальному использованию удобрений, экономии средств и снижению уровня загрязнения (полевая мера 1). Если для достижения согласованных целей требуются более активные усилия, могут быть предусмотрены дополнительные меры (например, меры, связанные с подготовкой почвы перед пересадкой саженцев).

## С. Соображения по поводу разработки пакетов мер

487. Пользователи настоящего руководства должны разрабатывать собственные практические примеры, основываясь на принципах и мерах, изложенных в настоящем руководстве. Ниже приводится резюме ключевых моментов, которые необходимо учитывать при разработке пакетов мер по комплексному устойчивому управлению азотом:

a) **оценить, какие из связанных с азотом угроз заслуживают первоочередного внимания** в рассматриваемой области/стране (например, загрязнение воздуха, воды, изменение климата, биоразнообразие), и существуют ли особые местные риски (например, конкретные уязвимые природные территории или водные объекты);

b) **оценить, существуют ли другие приоритетные вопросы**, касающиеся потоков элементов (например, углерода, фосфора, серы), которые необходимо рассматривать параллельно, и другие угрозы (например, нехватка воды);

c) **оценить степень амбициозности задач в каждой ситуации**, например в связи с местными или международными обязательствами по сокращению выбросов и воздействия;

d) **оценить, какие принципы являются наиболее применимыми** в конкретной ситуации (глава III) в зависимости от источников выбросов, местного и регионального контекста и форм азота, требующих первоочередного внимания;

e) **определить подходящие для различных форм азота меры** с учетом контекста и соответствующих проблем (на основе глав IV–VI).

488. На основе вышесказанного можно предложить проект пакета мер. Его необходимо рассмотреть на предмет того, насколько он помогает сократить выбросы разных форм азота в воздух и воду. Для каждого предлагаемого пакета мер актуальными являются следующие вопросы:

a) Охватывает ли пакет все важные **формы азота** в соответствии с согласованными целями и приоритетами?

b) **Дополняют ли пакетные меры друг друга в достижении общих целей**, таких как регулирование выбросов азота в его многочисленных формах, и согласуются ли они с принципами общего потока азота?

c) Каков будет **общий результат осуществления пакета мер** с точки зрения сокращения выбросов в атмосферу и воду, и является ли он достаточно амбициозным для достижения согласованных целей?

d) Какой **общий объем азота, который** в противном случае был потрачен впустую в виде выбросов в воздух и воду и денитрификации до  $N_2$ , **может быть сохранен** благодаря применению этого пакета мер?

e) **Какова величина сокращения выбросов азота в окружающую среду** по сравнению с ситуацией, когда борьба с такими выбросами не ведется? Как этот результат можно сравнить с закрепленной в Декларации Коломбо целью вдвое сократить азотные отходы к 2030 году (учитывая сумму всех путей потери  $N_r$  и выбросов  $N_2$ )?<sup>35</sup>

f) Каковы **начальные и текущие расходы** на реализацию пакета мер, и каков потенциал для сокращения этих расходов?

g) Какие **первоначальные и текущие выгоды** сулит пакет мер, включая объем азота, сохраненного при переходе к азотной экономике замкнутого цикла, в денежном выражении?

<sup>35</sup> См. <https://papersmart.unon.org/resolution/sustainable-nitrogen-management>.

h) Каковы **более широкие выгоды** от пакета мер для общества, включая выгоды для окружающей среды, экономики, здравоохранения и благосостояния в более широком контексте устойчивости, в денежном выражении?

i) Какова **связь с целями в области устойчивого развития**? Сколько целей помогает достичь пакет мер и каким образом?

489. Как показано в главе VI, многосторонний анализ предлагаемых пакетов мер может способствовать уточнению подхода, формированию консенсуса в отношении дальнейших действий, включая освещение связанных с ними возможностей (например, экономия средств, улучшение состояния окружающей среды, устойчивое использование ресурсов) и обсуждение потенциальных барьеров (например, расходы на осуществление, потребность в гармонизации, инструментах регулирования и инвестиционных возможностях для активизации практической работы).

490. Приведенный выше краткий перечень затрагивает не все вопросы. Его цель, скорее, заключается в том, чтобы помочь странам, иллюстрируя, как различные принципы и меры, описанные в этом руководящем документе, могут быть сведены воедино. На следующем этапе страны, регионы и местные общины должны приступить к рассмотрению собственных пакетов мер.

491. Предполагается, что обратная связь будет обеспечиваться в рамках деятельности по Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха и в партнерстве с другими международными процессами, в первую очередь через разработку Межконвенционного координационного механизма по азоту (ИНКОМ). Эта обратная связь играет важную роль для дальнейшей работы над руководящим документом в интересах других регионов Организации Объединенных Наций в контексте Международной системы управления азотом (МСУА), а также для оценки прогресса в деле достижения Целей в области устойчивого развития.

## **D. Дополнительные руководящие документы**

**Дополнительную информацию можно получить в следующих руководящих документах:**

Ammonia: Options for Ammonia Abatement: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Available at <http://www.clrtap-tfrn.org/content/options-ammonia-abatement-guidance-unece-task-force-reactive-nitrogen>.

Ammonia: United Nations Economic Commission for Europe Framework Code for Good Agricultural Practice for Reducing Ammonia Emissions Available at <http://www.unece.org/index.php?id=41358>.

Nitrates and nutrient cycles: Recommendations for establishing Action Programmes under Directive (2012) 91/676/EEC concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. Available at <https://ec.europa.eu/environment/water/water-nitrates/studies.html>.

Global overview of nutrient management: Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution (see especially Chapter 6: Practical options to reduce adverse effects by improving nutrient use). Available at <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/10747?show=full>.

Region-specific leaflets on best practices: «Resource efficiency in Practice — Closing Mineral Cycles». Examples from: Brittany (France) [EN, FR], central Denmark [EN, DK], Lombardy (Italy) [EN, IT], Murcia (Spain) [EN, ES], North-Brabant (Netherlands) [EN, NL], southern and eastern Ireland [EN], Weser-Ems (Germany) [EN, DE], Wielkopolskie (Poland) [EN, PL]. Available at [http://ec.europa.eu/environment/water/water-nitrates/index\\_en.html](http://ec.europa.eu/environment/water/water-nitrates/index_en.html) including project report: [https://ec.europa.eu/environment/water/water-nitrates/pdf/Closing\\_mineral\\_cycles\\_final%20report.pdf](https://ec.europa.eu/environment/water/water-nitrates/pdf/Closing_mineral_cycles_final%20report.pdf) (see p. 87 onwards).

Baltic Sea Action Plan: Helsinki Commission for Baltic Marine Environment Protection, HELCOM, Available at <http://helcom.fi/baltic-sea-action-plan>. Сельскохозяйственные меры см. сс. 86–96.

European Union River Basin Management Plans: including recommendations, см. по адресу [https://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/impl\\_reports.htm](https://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/impl_reports.htm).

Climate change: Mainstreaming climate change into rural development policy post 2013: Final report European Commission 2014. Available at [http://ecologic.eu/sites/files/publication/2015/mainstreaming\\_climatechange\\_rdps\\_post2013\\_final.pdf](http://ecologic.eu/sites/files/publication/2015/mainstreaming_climatechange_rdps_post2013_final.pdf) (see table 3 therein for list of measures).

Nitrogen use efficiency: European Union Nitrogen Expert Panel (2015). Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an Indicator for the Utilization of Nitrogen in Agriculture and Food Systems. Wageningen University, Netherlands. Available at <http://www.eunep.com/reports/>.

Nitrogen use efficiency: European Union Nitrogen Expert Panel (2016). Nitrogen Use Efficiency (NUE) — Guidance Document for Assessing NUE at Farm Level. Available at <http://www.eunep.com/reports/>.

National fertilizer recommendations (for example, UK RB209, Available at <https://ahdb.org.uk/nutrient-management-guide-rb209>).

Национальные кодексы надлежащей сельскохозяйственной практики: включая национальные кодексы надлежащей сельскохозяйственной практики, касающиеся аммиака, в соответствии с требованиями, предъявляемыми к сторонам, подписавшим Гётеборгский протокол.

## Е. Глоссарий основных терминов<sup>36</sup>

**Агролесоводство** — совместное выращивание и использование деревьев и кустарников, сельскохозяйственных культур и ведение животноводства в сельскохозяйственных системах.

**Азотфиксирующие культуры** — культуры, корневая система которых заселена бактериями, обладающими способностью переводить N<sub>2</sub> в доступный для растений азот (например, бобовые).

**Анализ экономических затрат на обеспечение социального благосостояния** — изучение воздействия распределения ресурсов на благосостояние общества посредством анализа эффективности затрат и социальных выгод.

**Анаэробное сбраживание** — ряд биологических процессов, при которых происходит расщепление биоразлагаемого вещества с помощью микроорганизмов без доступа кислорода.

**Антропогенные процессы** — процессы, происходящие в результате деятельности человека, в отличие от процессов, происходящих в природной среде без вмешательства человека.

**Биогенный азот** — в совокупности азот в любой химической форме, кроме динитрогена (N<sub>2</sub>).

**Биологическая фиксация азота** — процесс, посредством которого N<sub>2</sub> в воздухе преобразуется в NH<sub>3</sub> и другие формы N<sub>r</sub> особыми видами микроорганизмов.

**Биоуголь** — похожий на ископаемый уголь побочный продукт процесса пиролиза или анаэробного термического разложения органических материалов.

**Биодобрение** — вещества природного происхождения, богатые питательными веществами, такие как навоз, моча, птичий помет, компост.

<sup>36</sup> Настоящий Глоссарий частично опирается на *Глоссарий терминов RAMIRAN по животноводству и уборке, хранению и использованию навоза*. Recycling Agricultural, Municipal and Industrial in Agriculture Network (eds. B. Pain and H. Menzi), 2011.

**Биофильтры** — фильтрующий слой, в котором отходящий воздух или жидкость подвергаются действию микроорганизмов, способствующих их разложению.

**Бобовые** — группа растений, многие из которых способны извлекать  $N_2$  из атмосферы с помощью особых клубеньков, в которых находятся симбиотические азотфиксирующие бактерии.

**Болотные культуры** — культуры, выращиваемые в болотистой местности, преимущественно в заболоченных условиях.

**Борьба с загрязнением** — стратегии или методы, направленные на снижение поступления азота в окружающую среду и, таким образом, на сокращение прямого и косвенного воздействия.

**Буксируемый шланг** — тип ленточного разбрасывателя, использующий систему гибких шлангов для «внутрипочвенного» внесения навозной жижи, что позволяет снизить выбросы аммиака и устранить неприятный запах.

**Буферная полоса** — растительная полоса между сельскохозяйственными угодьями и рекой или ручьем. Это может быть лесополоса, созданная с целью снижения воздействия сопредельного землепользования на качество воды в ручье.

**Бюджет азота** — расчет поступающего и выводимого азота в системе, определенной во времени и пространстве.

**Возделывание промежуточных культур** — метод земледелия, состоящий в совместной посадке или выращивании нескольких культур на одном и том же участке.

**Волатилизация** — процесс перехода растворенного в воде соединения в газообразную фазу. Обычно используется для описания поступления аммиака в воздух из веществ, содержащих аммоний.

**Волочильный башмак** — тип ленточного разбрасывателя, использующий башмачную систему шлангов, которые следуют за поверхностью почвы. «Башмак» при протаскивании раздвигает растительный покров и жидкий навоз вносится полосами на поверхность почвы, тем самым снижая выделение аммиака и устраняя неприятный запах.

**Выщелачивание** — процесс вымывания растворимых ионов и соединений водой, проходящей через почву.

**Гидролиз** — химический процесс, приводящий к разложению и образованию новых соединений при взаимодействии с водой.

**Глубокая заделка** — внесение жидкого навоза или дигестата путем заправки в глубокие вертикальные борозды, обычно глубиной около 150 мм, прорезаемые специальной бороной.

**Денитрификация** — восстановление нитрата ( $NO_3^-$ ) до молекулярного азота ( $N_2$ ). В зависимости от условий возможно образование закиси азота ( $N_2O$ ) в качестве промежуточного продукта.

**ЕЭК** — Европейская экономическая комиссия — одна из пяти региональных комиссий, находящихся под юрисдикцией Экономического и Социального Совета Организации Объединенных Наций: включает в себя Европу, Восточную Европу, Кавказ, Центральную Азию и Северную Америку.

**Иммобилизация** — переход питательных веществ почвы из доступного для растений состояния в недоступную форму. Обратным процессом является минерализация — процесс, в ходе которого при разложении органических остатков высвобождаются питательные вещества, которые затем могут усваиваться растениями.

**Ингибитор уреазы** — соединение, используемое для замедления скорости гидролиза мочевины за счет снижения каталитической активности.

**Ингибиторы нитрификации** — синтетические или природные химические вещества, используемые для замедления процесса нитрификации.

**Интегрированный** — объединяющий или координирующий отдельные элементы для обеспечения слаженного, взаимосвязанного целого процесса.

**Искусственные водно-болотные угодья** — искусственно созданные водно-болотные угодья с использованием биофильтров, позволяющих снижать выбросы азота и фосфора из стоков с полей в водную среду.

**Искусственные водно-болотные угодья** — очистные системы, в которых для очистки сточных вод используются естественные процессы, включающие водно-болотную растительность, почвы и связанные с ними микробные сообщества.

**Капельное орошение** — метод полива сельскохозяйственных культур, при котором вода через систему шлангов и трубопроводов подается непосредственно к отдельным растениям.

**Капельные биологические фильтры** — комбинация биофильтра и биоскруббера. Принцип их работы аналогичен биофильтрам, за исключением того, что водная фаза протекает через инертную загрузку. Просачивающийся раствор содержит основные неорганические питательные вещества, которые обычно рециркулируются.

**Каскад азота** — последовательная передача  $N_r$  через системы окружающей среды. Это приводит к многочисленным изменениям окружающей среды по мере того, как  $N_r$  проходит через каждую систему или хранится в ней.

**Компост** — материал, получаемый в процессе компостирования, т. е. биологического аэробного разложения твердых органических отходов.

**Лесистая местность** — естественная среда, где деревья являются доминирующей формой растений.

**Мелкая заделка** — внесение жидкого навоза или дигестата путем заправки в неглубокие вертикальные борозды, обычно глубиной около 50 мм, прорезаемые культиваторной лапой или диском.

**Минерализация** — процесс разложения органического вещества, приводящий к высвобождению питательных веществ в растворимых неорганических формах, которые затем могут усваиваться растениями (процесс обратный «иммобилизации»).

**Многолетние культуры** — виды сельскохозяйственных культур, живущие более двух лет.

**Навоз** — органические материалы, используемые в сельском хозяйстве в качестве удобрения. Животный навоз состоит из фекалий и может содержать подстилку и мочу (в этом случае он называется «стойловый навоз»). Сидерат — это культура, выращиваемая с целью последующего внесения в почву.

**«Натура 2000»** — сеть важнейших природоохранных участков на территории стран Европейского союза, выделенных в соответствии с Директивой Европейского союза по сохранению сред обитания и Директивой об охране диких птиц.

**Неорганические удобрения** — искусственные неорганические и биоминеральные удобрения, часто называемые синтетическими удобрениями. К ним относятся все виды минеральных азотных удобрений, такие как аммиачная селитра и сульфат аммония, а также карбамид (и удобрения на основе карбамида).

**Нитрификация** — биологический процесс окисления аммиака до нитрита с последующим окислением нитрита до нитрата.

**Облесение** — лесонасаждение или разведение леса путем посадки деревьев в местах, где раньше они не произрастали.

**Обработка навоза** — ряд различных процессов, с помощью которых можно обрабатывать навоз с целью повышения его добавленной стоимости. Примеры включают повышение концентрации питательных веществ, уменьшение запаха и объема.

**Орошение дождеванием** — метод орошения, имитирующий естественное выпадение осадков.

**Отгонка аммиака** — физико-химический процесс удаления аммиака из канализационных вод, навозной жижи, сточных вод и др.

**Оценка фактических результатов** — оценка результатов действия после его осуществления.

**Переработка навоза** — процессы преобразования различных видов и источников навоза в продукты с высокой добавленной стоимостью. Это включает производство навоза в гранулах.

**Питательные вещества** — элементы, присутствующие в продуктах питания и кормах, которые необходимы для жизни и здоровья.

**Подстилка** — смесь экскрементов с подстилочным материалом в различных пропорциях. Этот термин может также относиться к разложившемуся опавшему растительному материалу (например, листовая подстилка).

**Постоянное лугопастбищное угодье** — земля, непрерывно используемая для выращивания кормов или фуража.

**Превышение** — количество загрязнения, превышающего «критический уровень» или «критическую нагрузку». Оно может выражаться различными способами, например, накопленной площадью превышения.

**Предварительная оценка** — оценка вероятности успешного результата действия до его осуществления.

**Промежуточная культура** — быстрорастущая культура, которая выращивается между последовательными посадками основной культуры и помогает снизить потери азота во время периода парования.

**Рамсарские угодья** — водно-болотные угодья, имеющие международное значение в соответствии с Конвенцией о водно-болотных угодьях, имеющих международное значение, особенно в качестве местобитаний водоплавающих птиц (Рамсарская конвенция).

**Регулирование пищевого рациона** — меры, состоящие в изменении типа, количества и качества корма для животных или пищи для человека.

**Резервирование** — политика вывода земель из производства для уменьшения перепроизводства сельскохозяйственных культур.

**Ризобии (Rhizobia)** — азотфиксирующие почвенные бактерии, живущие в корневых клубеньках бобовых культур.

**С участием большого числа участников** — с участием группы партнеров, обладающих взаимодополняющими видами знаний — научных, практических и других. Они объединяют усилия в деятельности с начала до конца реализации проектов.

**Севооборот** — сельскохозяйственная практика чередования во времени различных культур на одном и том же поле.

**Севооборот** — система чередования различных видов сельскохозяйственных культур на одной и той же площади в течение нескольких вегетационных сезонов.

**Секвестрация углерода** — улавливание и удаление диоксида углерода из атмосферы и его хранение в альтернативных накопителях; например, в органическом веществе почвы, древесном угле, деревьях.

**Скребок** — механический инструмент с переменным количеством зубьев, используемый для обработки гофрированного пола в помещениях для содержания животных в целях обеспечения чистоты и предотвращения скольжения животных.

**Смена загрязнителя** — происходит, когда мера по смягчению последствий загрязнения, введенная для снижения уровня одного загрязнителя, приводит к повышению уровня другого загрязнителя.

**Смешанное сельское хозяйство** — растениеводство (выращивание различных культур, например однолетних, многолетних и постоянных культур) в сочетании с животноводством.

**Смягчение воздействия азота** — снижение неблагоприятного воздействия любого соединения N<sub>r</sub>, например атмосферных загрязнителей NH<sub>3</sub> и NO<sub>x</sub>, водного загрязнителя NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, или парникового газа N<sub>2</sub>O.

**Снижение выбросов** — применяемая технология или принимаемые меры по снижению объема выбросов и их воздействия на окружающую среду.

**Содержание на глубокой подстилке** — система содержания животных с многократно используемой подстилкой при стойловом или открытом содержании животных.

**Сопутствующая выгода** — случайная выгода для решения вторичной проблемы, возникающая в результате решения первичной проблемы (например, использование такого метода для борьбы с загрязнением, который также является более эффективным по затратам).

**Сопутствующая культура** — высаживание разных культур в непосредственной близости друг от друга с различными целями, в том числе для борьбы с вредителями.

**Стойловое содержание скота** — система содержания, при которой животные содержатся в помещениях различного типа.

**Сток** — часть воды на поверхности почвы, которая попадает в водотоки со взвешенным или растворенным веществом.

**Струвит** — соединение, состоящее из фосфата магния—аммония. Он может осаждаться из жидкой суспензии и сточных вод, образуя твердую фракцию, позволяющую восстанавливать питательные вещества.

**Удержание азота** — разница между входным и выходным количеством азота. Этот термин обычно применяется к пресноводным водосборным бассейнам, но может использоваться и в других контекстах.

**Ультрафильтрация** — процесс очистки воды посредством мембранной фильтрации.

**Управление навозом** — уборка, хранение, обработка и использование навоза животного происхождения экологически рациональным образом.

**Управление системой дренажа** — метод, позволяющий фермерам более эффективно регулировать дренаж, используя гидротехническую дренажную систему для установки дренажного водовыпуска на различной глубине.

**Уреаза** — фермент, катализирующий гидролиз мочевины.

**Урожайность** — количество продукции растениеводства с единицы посевной площади.

**Фекалии** — навоз, твердая фракция экскрементов животных.

**Фертигация** — добавление водорастворимых продуктов в оросительные системы с целью внесения удобрений.

**Цеолит** — минерал из вулканогенно-осадочных пород, обладающий способностью к адсорбции и ионному обмену.

**Эвтрофикация** — насыщение экосистем (земных и водных) биогенными элементами, особенно соединений азота и/или фосфора.

**Экономика замкнутого цикла** — экономика, основанная на повторном использовании и возобновлении ресурсов (отсюда и «цикличность»).

**Экосистемные услуги** — блага, получаемые людьми от экосистем. К ним относятся услуги по снабжению, например продовольствием и водой; регулятивные услуги, например борьба с наводнениями и болезнями; культурные услуги, например

духовные, рекреационные и культурные блага; и вспомогательные услуги, такие как кругооборот питательных веществ, обеспечивающий условия для жизни на Земле.

**Экскременты** – фекалии животных.

**Энтеральный метан** — метан, продуцируемый в первом отделе желудка (рубце) жвачных животных. Жвачные животные — млекопитающие, получающие питательные вещества в результате процесса микробиологической энтеральной ферментации корма, например коровы и овцы.

---