

Российская академия наук  
Федеральное государственное научное учреждение  
«Агрофизический научно-исследовательский  
институт»  
(ФГБНУ АФИ)

---

С. Е. ВИТКОВСКАЯ

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ХИМИЧЕСКИХ МЕЛИОРАНТОВ**



Санкт-Петербург  
2017

Российская академия наук  
Федеральное государственное научное учреждение  
«Агрофизический научно-исследовательский институт»  
(ФГБНУ АФИ)

---

С. Е. ВИТКОВСКАЯ

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ХИМИЧЕСКИХ МЕЛИОРАНТОВ**

Санкт-Петербург  
2017

УДК 631.821 : 631.95 : 631.42  
ББК 40.40 : 28.8 : 40.4  
В54

Рецензенты:

Лекомцев П. В. доктор биол. наук, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»

Попов А. И. доктор с.х. наук, Санкт-Петербургский Государственный университет

**Витковская С. Е.**

В54 Методы оценки эффективности и экологической безопасности и химических мелиорантов. – СПб.: АФИ, 2017. – 76 с.

ISBN 978-5-905200-35-9

*Утверждено решением Ученого совета  
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»  
«05» октября 2017 г (протокол № 8)*

В монографии детально рассмотрены понятия эффективности и экологической безопасности веществ, применяемых для повышения плодородия почв, а также методы, которые можно использовать для количественной оценки этих показателей. Сформулированы критерии оценки эффективности и экологической безопасности известковых мелиорантов. Представлена методика закладки и проведения полевых экспериментов с известковыми мелиорантами. Показано, что важнейшая методическая задача экспериментов с известковыми мелиорантами – установление доз, которые можно рассматривать как эффективные и экологически безопасные по отношению к физико-химическим свойствам почвы, продуктивности и элементному составу сельскохозяйственных культур. Представлены модели, аппроксимирующие изменение кислотно-основных свойств почвы и нарастания биомассы растений в зависимости от дозы мелиоранта и времени взаимодействия его с почвой. Показано, что построение зависимостей время-ответ и доза-ответ, характеризующих влияние изучаемых факторов на изменения параметров плодородия пахотных почв и скорости нарастания биомассы позволяет количественно оценить пролонгированность действия той или иной дозы мелиоранта на свойства почвы, урожайность и скорость нарастания биомассы сельскохозяйственных культур. В качестве примера, иллюстрирующего информативность полевого прецизионного эксперимента, изложены результаты многолетнего микрополевого опыта, характеризующие влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы и распределение макро- и микроэлементов в системе «почва – растение». Для ученых и специалистов, работающих в областях агрохимии, почвоведения, и агроэкологии, студентов и аспирантов.

ISBN 978-5-905200-35-9

© ФГБНУ АФИ, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. ПОНЯТИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ И МЕЛИОРАНТОВ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ</b>	
<b>1.1 Эффективность применения мелиорантов</b> .....	7
<b>1.2 Экологическая безопасность применения мелиорантов</b> .....	11
1.2.1 Методические подходы к обеспечению экологической безопасности применения мелиорантов .....	16
1.2.1.1 <i>Нормирование поступления примесных элементов в почву с мелиорантами</i> .....	16
1.2.1.2 <i>Анализ риска изменения экологического состояния агроэкосистем</i> .....	19
<b>1.3 Критерии оценки эффективности и экологической безопасности известковых мелиорантов</b> .....	27
1.3.1 Отличительные особенности применения известковых мелиорантов .....	27
1.3.2 Основные виды известковых мелиорантов и их экологическая безопасность.....	28
1.3.3 Критерии оценки эффективности известковых мелиорантов.....	37
<b>ГЛАВА 2. ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ОПЫТОВ С ИЗВЕСТКОВЫМИ МЕЛИОРАНТАМИ</b>	
<b>2.1 Основные задачи полевого эксперимента с известковыми мелиорантами</b> ...	40
<b>2.2 Планирование и проведение эксперимента</b> .....	41
2.2.1 Контролируемые параметры. Результаты эксперимента .....	43
2.2.1.1 <i>Агрохимические параметры почвы</i> .....	43
2.2.1.2 <i>Всхожесть и урожайность сельскохозяйственных культур</i> .....	44
2.2.1.3 <i>Элементный состав сельскохозяйственных культур</i> .....	46
2.2.1.4 <i>Динамика нарастания биомассы и изменения элементного состава сельскохозяйственных культур</i> .....	46
2.2.1.5 <i>Вынос химических элементов из почвы растениями</i> .....	49
<b>ГЛАВА 3. ПРИМЕР ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ИЗВЕСТКОВЫМ МЕЛИОРАНТОМ</b>	
<b>3.1 Объекты и методы исследования</b> .....	51
<b>3.2 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на всхожесть, динамику высоты и урожайность растений ячменя</b> .....	52
<b>3.3 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотно-основные свойства почвы</b> .....	55
<b>3.4 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание подвижных соединений алюминия, марганца и железа в почве</b> .....	60
<b>3.5 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание кадмия в растениях ячменя</b> .....	63
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	67
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	70

## ВВЕДЕНИЕ

Химическая мелиорация представляет собой широкий спектр мероприятий, направленных на улучшение химических, физических и агрохимических свойств почв (регулирование кислотности, щелочности, обогащение питательными элементами, улучшение структуры почв; включает известкование кислых почв, фосфоритование почв, гипсование солонцов и солонцеватых почв, кислование содовых солончаков и др.) (Словарь-справочник..., 2006). Мелиоративным является любой прием, направленный на улучшение условий роста и развития растений в агроценозе. Для Нечерноземной зоны основными приемами химической мелиорации почв являются внесение минеральных удобрений и известкование.

В последние десятилетия в Российской Федерации уровень применения удобрений и известки сократился в десятки раз. По некоторым оценкам (Проблемы..., 2008), ежегодный вынос питательных веществ из почв пашни в пять раз превышает их возврат с вносимыми минеральными и органическими удобрениями. Сокращение масштабов химической мелиорации кислых почв является одним из значимых факторов, определяющих процессы деградации агроземов Нечерноземной зоны. Вследствие сокращения площадей известкуемых почв, значительная доля пахотных почв подвержена подкислению. Если в 2000 г. кислые почвы в Российской Федерации ( $\text{pH} < 5,5$ ) занимали 36,7 млн. га, то в настоящее время их площадь достигла 50 млн. га (Литвинович, 2014). Наблюдается смещение на юг границы кислых почв. Потери сельскохозяйственной продукции на кислых почвах составляют 15–16 млн. т в пересчете на зерно в год (Проблемы..., 2008).

Известкование – обязательный и незаменимый прием сохранения и воспроизводства плодородия кислых почв агроландшафтов. Известно (Шильников, Лебедева 1987; Шильников и др., 2008), что на кислых почвах на 30–40% снижается эффективность минеральных удобрений, в 3–5 раз увеличивается накопление в растениеводческой продукции тяжелых металлов и радионуклидов. Известкование – один из наиболее экономически выгодных приемов повышения урожая сельскохозяйственных культур на кислых почвах. За ротацию 6–8-польного севооборота 1 т  $\text{CaCO}_3$  обеспечивает прибавку урожая на 6–8 ц·га<sup>-1</sup>

зерновых единиц. Известковые мелиоранты удовлетворяют потребность растений в кальции как элементе минерального питания, повышают эффективность применения минеральных удобрений, нивелируют эффект подкисления почв вследствие применения физиологически кислых удобрений (Минеев, 2004).

Проведение полевых опытов с целью оценки эффективности и экологической безопасности химических мелиорантов регламентировано, прежде всего, по отношению к новым мелиорантам, влияние которых на урожайность сельскохозяйственных культур и качество структурных компонентов агроценоза изучено недостаточно. Особого внимания требуют такие удобрения и мелиоранты, в составе которых в почву могут поступать примесные элементы, представляющие опасность для здоровья человека и окружающей природной среды. Применение новых методических подходов для оценки эффективности и экологической безопасности вносимых в почву веществ позволит повысить информативность полевых опытов, существенно дополнить имеющуюся информацию о влиянии традиционных приемов окультуривания почв на параметры плодородия агроземов, урожай и качество сельскохозяйственных культур.

Необходимость разработки методических основ проведения полевых опытов с известковыми мелиорантами обусловлена отличительными особенностями приемов и средств известкования кислых почв, по сравнению с другими приемами повышения плодородия почв. Методика проведения экспериментов с известковыми мелиорантами должна учитывать специфические особенности химического и фракционного составов мелиорантов, технологий их применения и механизмов взаимодействия мелиоранта со всеми структурными компонентами агроэкосистемы.

В монографии детально рассмотрены понятия эффективности и безопасности веществ, применяемых для повышения плодородия почв, а также методические подходы, которые можно использовать для количественной оценки этих показателей. Сформулированы критерии оценки эффективности и экологической безопасности известковых мелиорантов. Представлена методика закладки и проведения полевых опытов с известковыми мелиорантами, позволяющая получить экспериментальные данные, на основании анализа которых можно количественно оценить влияние вносимых в почву веществ на урожай-

ность, элементный состав сельскохозяйственных культур и динамику параметров плодородия агроземов в зависимости от дозы и времени взаимодействия мелиоранта с почвой. В качестве примера, иллюстрирующего информативность полевого прецизионного эксперимента, представлены результаты многолетнего микрополевого опыта, характеризующие влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы и распределение макро- и микроэлементов в системе «почва – растение».

# ГЛАВА 1.

## ПОНЯТИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ И МЕЛИОРАНТОВ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

### 1.1 Эффективность применения мелиорантов

Мероприятия по применению удобрений в сельском хозяйстве должны быть экономически выгодны и энергетически целесообразны (Минеев, 2004). Эффективность – форма выражения цели производства. Она показывает полезный эффект от применения различных ресурсов (трудовых, денежных, материальных, земельных и т. д.). Повышать эффективность – значит получить больше продукции на единицу затраченных ресурсов. В сельском хозяйстве критерием эффективности является увеличение выхода сельскохозяйственной продукции с единицы земельной площади при наименьших затратах трудовых и материально-денежных ресурсов (Экономика..., 2016).

В сельскохозяйственном производстве для оценки эффективности применения удобрений принято использовать показатели агрономической, экономической, энергетической и экологической эффективности. Под агрономической эффективностью удобрений понимают результат их действия на основную продукцию, выраженный прибавкой урожая ( $\text{ц}\cdot\text{га}^{-1}$ ) и окупаемостью 1 кг действующего вещества NPK или 1 т органических удобрений ( $\text{кг продукции} / 1 \text{ кг д.в. NPK}$ ;  $\text{кг продукции} / 1 \text{ т органических удобрений}$ ) (Система применения..., 2011). Прибавка рассчитывается по отношению к урожаю, полученному без применения удобрений (контрольный вариант опыта). В севооборотах агрономическую эффективность выражают в кормовых (зерновых) единицах.

Агрономическую эффективность можно оценить экспериментальным или расчетным методами. Экспериментальный метод предусматривает проведение производственных полевых экспериментов по стандартной методике (наличие контрольного варианта, повторность 3-х кратная). Следует учитывать, что результаты, полученные в условиях полевого эксперимента, будут существенно варьироваться в зависимости от почвенно-климатических условий, генетически обусловленных, видовых и сортовых особенностей опытных культур, а также таких немаловажных факторов, как неоднородность параметров плодородия почвы в пределах опытного участка и качества посевного материала (Витков-



ская, 2011). Результат однолетнего полевого эксперимента характеризует агрономическую эффективность тестируемого удобрения только по отношению к урожаю конкретной сельскохозяйственной культуры, полученному на том или ином типе почв при определенном уровне плодородия.

Суть расчетного метода состоит в расчете прогнозируемого урожая и его сравнении с урожаем фактическим. Агрономическая эффективность ( $\mathcal{E}$ ) рассчитывается по формуле (Система применения...., 2011):

$$\mathcal{E} = M/D,$$

где  $M$  – прибавка урожая, кг, по отношению к контрольному варианту опыта,  $D$  – доза внесенных удобрений, кг д.в.·га<sup>-1</sup>.

*Пример определения агрономической эффективности экспериментальным методом.* Схема полевого опыта включает три варианта: 1) N0P60K60; 2) N60P60K60; 3) N90P60K60. Урожай зерна озимой ржи составил 25, 40 и 44 ц·га<sup>-1</sup> в вариантах 1–3, соответственно. Прибавка урожая от внесения азотных удобрений в варианте 2 – 15 ц·га<sup>-1</sup>, в варианте 3 – 19 ц·га<sup>-1</sup>. Окупаемость (агрономическая эффективность) одного кг д.в. азотных удобрений составила 25 и 21,1 кг зерна в вариантах 2 и 3, соответственно.

Основными методами и подходами, применяемыми для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур, являются (Бондур и др., 2013): метод анализа тренда и цикличности в динамичности урожайности; метод, основанный на выявлении года-аналога; моделирование прироста биомассы растений; метод, основанный на анализе синоптических процессов; регрессионный метод с использованием спутниковых данных.

Годичные колебания урожайности достаточно точно предсказываются вегетационными индексами в период вегетации сельскохозяйственных культур (Савин и др., 2010; Бондур, Чимитдоржиев, 2008; Белоусцева, 2012). Наиболее распространенным индикатором роста и плотности растительности, рассчитываемым по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), является индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный индекс растительности), (Бондур и др., 2013).

Экономическая эффективность характеризует отношение экономического эффекта к ресурсам обуславливающий этот эффект, или наоборот – отношение

ресурсов к величине экономического эффекта. Чем больше эффект и меньше затрачено ресурсов, тем выше экономическая эффективность (Экономика..., 2016).

Определение экономической эффективности удобрений показывает, насколько рентабельно их применение. Оценка экономической эффективности применения удобрений проводится на основании экономических показателей, основными из которых являются (Система применения..., 2011):

1) Стоимость прибавки урожая за счет удобрений, руб. (Сп). Определяется по ценам реализации продукции в период расчета.

2) Дополнительные затраты на применение удобрений, руб. (Зд). Включают расходы на приобретение, транспортировку, погрузку, разгрузку и внесение удобрений. Дополняются расходами на уборку, доработку и реализацию дополнительной продукции (прибавки), полученной за счет применения удобрений.

3) Условно чистый доход, руб. (УЧД).  $УЧД = Сп - Зд$ .

4) Рентабельность (Р), %.  $Р = УЧД / Зд \cdot 100$ .

Рентабельность (Р) применения удобрений в севообороте за весь срок их действия может быть выражена формулой (Минеев, 2004):

$$P = \frac{\Sigma C - \Sigma A}{\Sigma A},$$

где  $\Sigma C$  – суммарная стоимость продукции, полученная от применения удобрений в севообороте, руб.;  $\Sigma A$  – суммарные затраты на удобрение и уборку прибавки урожая в севообороте, руб.

Энергия, накопленная в сельскохозяйственной продукции, оценивается в мегаджоулях (МДж) и учитывается в основной продукции и в общем урожае с учетом побочной продукции (Минеев, 2004):

Основным показателем энергетической эффективности является биоэнергетический коэффициент (Кб) (Система применения..., 2011):

$$Кб = Эп / Эз,$$

где Кб – биоэнергетический коэффициент, Эп – энергия, накопленная в прибавке урожая, МДж; Эз – суммарные энергозатраты на применение удобрений, МДж. Применение удобрений считают энергетически оправданным при  $Кб > 1$ .

Количество энергии, накопленной в прибавке урожая, полученной за счет применения удобрений, рассчитывается по формуле (Система применения..., 2011):

$$Эп = П С \cdot 100,$$

где Эп – количество энергии в прибавке урожая, МДж·га<sup>-1</sup>; П – прибавка урожая, ц·га<sup>-1</sup>; С – содержание энергии в 1 кг урожая, МДж; 100 – коэффициент перевода ц в кг. Содержание энергии в 1 кг растениеводческой представлено в таблице 1.

**Таблица 1. Содержание общей энергии в 1 кг урожая (Система применения..., 2011)**

Культура	Общая энергия в 1 кг урожая в натуре, МДж	Культура	Общая энергия в 1 кг урожая в натуре, МДж
Пшеница озимая (зерно)	16,46	Лен-долгунец (семена)	20,68
Рожь (зерно)	16,76	Сахарная свекла (корни)	4,56
Ячмень (зерно)	16,45	Картофель (клубни)	4,02
Овес (зерно)	16,17	Кормовые корнеплоды	4,10
Гречиха (зерно)	16,67	Овощные культуры	1,44
Фасоль (зерно)	17,78	Многолетние травы (сено)	3,78
Горох (зерно)	17,69	Однолетние травы (сено)	3,28
Кукуруза (зерно)	15,14	Люцерна (сено)	5,46
Кукуруза (зеленая масса)	4,10	Лугопастбищные травы (сено)	3,28
Лен-долгунец (волокно)	18,01		

Экологическая эффективность проявляется как результат восстановления и сохранения плодородия почв, отсутствие негативного воздействия на сопредельные среды (Федеральная..., 2013).

В работе (Качанова, 2015) для оценки эффективности применения минеральных удобрений предложено использовать коэффициент (КЭ<sub>МУ</sub>), который зависит от следующих качественных и количественных факторов: S<sub>i</sub> – площадь посева i-й сельскохозяйственной культуры; D<sub>НПК</sub> – дозы внесения минеральных удобрений; Y<sub>ij</sub> – урожайность i-й сельскохозяйственной культуры на j-м участке поля:

$$КЭ_{МУ} = f(S_i, D_{НПК}, Y_{ij}).$$

Коэффициент эффективности применения минеральных удобрений автор представляет как отношение прибавки урожая, приходящейся на использование удобрений, в стоимостном выражении ( $\Delta Y_{ij}$ ) к сумме затрат на приобретение и

внесение минеральных удобрений ( $\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^i Z_{MY}$ ):

$$KЭ_{MY} = \frac{\Delta Y_{ij}}{\sum \sum Z_{MY}}.$$

Применение минеральных удобрений экономически целесообразно при  $KЭ_{MY} > -1$  (Качанова, 2015).

Представленные выше методические подходы могут быть использованы в том числе, и для оценки агрономической и экономической эффективности применения известковых мелиорантов. Однако, при проведении полевых опытов с целью оценки эффективности и экологической безопасности как новых, так и традиционных известковых мелиорантов, следует учитывать ряд особенностей технологий их применения и воздействия на структурные компоненты агроэкосистемы.

## **1.2 Экологическая безопасность применения мелиорантов**

Ориентированность сельскохозяйственного производства на получение высоких урожаев сельскохозяйственных культур сопровождается возрастанием уровня антропогенного воздействия на агроэкосистемы. Обеспечение экологической безопасности является одной из важнейшей задач для сельскохозяйственного производства. Наряду с использованием новых разработок в семеноводстве, агротехнике и системе земледелия для повышения урожайности сельскохозяйственных культур, будут возрастать дозы вносимых агрохимикатов. Этот процесс повлечет за собой увеличение концентраций примесных элементов, пестицидов и нитратного азота в системе почва-растение, усиление воздействия на сопредельные с почвой среды (Витковская, Хофман, 2013).

Применяемые в сельскохозяйственном производстве средства химизации воздействуют на все компоненты агроэкосистемы, изменяя качественные и количественные характеристики системы «почва – растение» и контактирующих с почвой сред. Негативное влияние вносимых в почву мелиорантов может проявляться в следующем:

1) Нерациональное применение удобрений может оказать негативное влияние на баланс содержания элементов минерального питания растений в почве и параметры плодородия почвы.

2) Нарушение технологий применения удобрений, несоответствие вносимых в почву веществ санитарным нормам, могут приводить к снижению урожайности сельскохозяйственных культур и качества продукции.

3) Применение повышенных доз минеральных и органических удобрений приводит к возрастанию потока биогенных элементов в системах «почва – растения» и «почва – водная среда». Следствием миграции азота и фосфора поступающего в почву в составе органических и минеральных удобрений является загрязнение грунтовых вод и эвтрофикация водоемов. Изучение эффективности применения удобрений показало (Смирнов, 1977; Овсянников, 2000), что из общего количества внесенного в почву азота, сельскохозяйственными растениями усваивается около 40%.

4) Производство и применение азотных удобрений является одним из антропогенных источников поступления соединений азота в атмосферный воздух. Следствия поступления  $N_2$ ,  $N_2O$ ,  $HNO_3$  в атмосферу – парниковый эффект и кислотные осадения.

5) Повышенное содержание нитратов и нитритов в продуктах питания оказывает токсическое действие на организм человека.

6) Минеральные, органические удобрения и мелиоранты являются одним из источников поступления в почву химических элементов, негативно влияющих на качество агроэкосистем. Этот экологический аспект применения средств химизации заслуживает особого внимания.

Тяжелые металлы в различных количествах присутствуют во всех видах минеральных удобрений и пестицидов, и являются естественными примесями, количество которых зависит от элементного состава сырья и технологии его переработки (Витковская, 2006; Витковская, 2012). Как следствие – химизация сельскохозяйственного производства сопровождается увеличением концентраций примесных элементов в почве, сельскохозяйственных растениях и в организме человека.

Особенно обогащены тяжелыми металлами природные фосфаты (Минеев, 1988; Рэуце, Кырстя, 1986; Алексеев, 1987; Потатуева и др., 1994; Карпова и др., 1990; Носовская и др., 2001). Фосфорные удобрения по существу являются полиминеральным сырьем (Геохимия..., 1990) (табл. 2).

Таблица 2. Типоморфные элементы-примеси фосфорных удобрений и кормовых добавок (Геохимия..., 1990)

Вид продуктов	Коэффициенты концентрации относительно Кларка			
	50–25	25–10	10–5	до 5
Удобрения				
Нитроаммофос из апатита	–	–	As, Se, La, F	Y, Sn
Аммофос из апатита	–	–	As, Se, La, F, Sn	Y, Sr
Аммофос из фосфорита	–	As, F	Cd, Sn	Y, Pb
Двойной суперфосфат из фосфорита	–	As, F, La	Y, Se, Sr, Cd, Sn	Nb
Фосфоритная мука из фосфорита	As	F	Cd, Pb, Sn Sr	Y, La, Se, Zn
Кормовые добавки				
Диаммоний фосфат и монокальций фосфат	–	As	Cd, Sn	Y, Sr, La
Кальций фосфат кормовой	–	As	F, Y, La, Cd, Sn	Ce, Pb

Концентрация ТМ в некоторых фосфоритах может колебаться в широких пределах. Так, в 12-ти образцах фосфоритов из Африки, США и Перу содержание общего Cd составляло 5–47 мг·кг<sup>-1</sup>, Co 6–104 мг·кг<sup>-1</sup>, Cu 5–41 мг·кг<sup>-1</sup>, Cr 18–331 мг·кг<sup>-1</sup>, Li 2–9, Mn 11–6553, Ni 1–61, Pb 7–43, Rb 3–18, Zn 54–576 мг·кг<sup>-1</sup> (Kromblekou, Tabatabai, 1994).

По данным (Милащенко, Захаров, 1991), за весь период использования фосфорных удобрений, в почвы бывшего СССР внесено 3200 т кадмия, 16633 т – свинца, 553 т – ртути. Период полувыведения кадмия из почвы составляет 110 лет, цинка – 510, меди – 1500, свинца несколько тысяч лет (Химическое загрязнение..., 1991; Овсянников, 2000). Согласно имеющимся оценкам (Черников, 2002), на 1 т P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в некоторых фосфорных рудах приходится 3–40 кг Sr. Стронций в составе удобрений и мелиорантов, изготавливаемых из фосфатного сырья (фосфоритов и апатитов различных месторождений), находится в изоморфной примеси. Это суперфосфаты: простой и двойной (1,5 и 0,26% содер-

жания Sr соответственно); фосфоритная мука (0,47% Sr); азофоска (0,20% Sr); фосфогипс (до 3,5% Sr), конверсионный мел (1,5% Sr) (Лаврищев, 2016).

Суперфосфат и фосфогипс содержат 1–5% фтора. Ежегодное их использование способствует повышению содержания фтора в почве на 5%, а при длительном применении фосфорных удобрений (в течение 15 лет и более) содержание этого элемента в слое почвы 0–30 см может увеличиться в 1,7–5 раз (Овсянников, 2000).

По данным (Минеев, 1988), концентрация Cd в калийных и натриевых удобрениях (Австралия) достигает 50–170 мг·кг<sup>-1</sup>; в калийных удобрениях (Индия) концентрации Zn и Pb составляют 4–55 и 42–160 мг·кг<sup>-1</sup> соответственно. Удвоение фонового содержания металлов в почве при интенсивном применении удобрений возможно за 80 и более лет (Овсянников, 2000).

Органические удобрения характеризуются невысокими концентрациями большинства ТМ (Макарова и др., 2002; Гогмачадзе, 2010), однако регулярное их применение может оказаться более значимым фактором, влияющим на накопление примесных элементов в почве, чем внесение минеральных удобрений. Основная причина в том, что суммарное поступление примесных элементов с органическими удобрениями больше, чем с минеральными удобрениями (Витковская, 2013).

В полевом опыте (МСХА им. К. А. Тимирязева) было установлено (Бушуев, 2006), что при длительном совместном внесении NPK и навоза на известкованном фоне в пахотном слое дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы валовое содержание кадмия возросло в 2,9 раза, цинка и кобальта – в 1,4 раза по сравнению с контролем без удобрений.

В полевом опыте, заложенном на территории ЛНИИСХ «Белогорка», выявлено (Небольсин, Небольсина, 2010), что регулярное внесение минеральных удобрений в течение 34 лет привело к увеличению содержания подвижных соединений (экстрагент – ацетатно-аммонийный буфер pH 4,8): стронция – в пять раз, никеля – в два раза, кобальта – в 1,9 раза и марганца – в 2,6 раза по сравнению лесной почвой, сходной по генезису.

Как в России, так и за рубежом отмечены случаи загрязнения почв при использовании твердых бытовых отходов (ТБО) и осадке сточных вод (Левин-

ский и др., 1997; Геохимия..., 1990; Соколов, Черников, 1999; Овчаренко, 1997; Schulz, Romheld, 1997; Berrow, 1986; Аристархов, Харитонов, 2002; Витковская, 2012).

Компост из ТБО может рассматриваться как эффективный мелиорант для кислых почв и обладает длительной нейтрализующей способностью. Использование его на кислых дерново-подзолистых почвах равноценно известкованию. Нейтрализующее действие компоста более продолжительно, чем при использовании известняковой муки. С 1 т компоста (сухого вещества) в почву поступает от 55 до 118 кг Са. Значительная доля кальция находится в соединениях, способных к диссоциации с высвобождением ионов  $Ca^{2+}$  при взаимодействии с почвенным раствором (Витковская, Дричко, 2004; Витковская, 2012).

Применение компостов на основе ТБО ограничено вследствие повышенного содержания солей тяжелых металлов. Систематическое, бесконтрольное использование компоста может привести к полиэлементному загрязнению почв. В настоящее время компост может использоваться для повышения плодородия кислых почв и урожайности сельскохозяйственных культур только при условии обоснованных нами нормирования, контроля доз и периодичности внесения (Витковская, 2006).

Информация о влиянии средств химизации на содержание ТМ в почвах весьма противоречива, что закономерно, так как накопление химических элементов в почвах существенно зависит от почвенно-климатических условий и химического состава вносимых веществ (Витковская, 2013). Кроме того, как справедливо отмечено Г. Д. Гогмачадзе (2010), удобрения как фактор, влияющий на содержание тяжелых металлов в почве и растениях, изучают сравнительно недавно (Витковская, 2013).

Ряд авторов полагает, что в настоящее время приток тяжелых металлов в почву с удобрениями превышает отток, имеет место длительный срок удержания элементов в пахотном горизонте почв и дальнейшая их аккумуляция (Гребенникова, 1997; Гришина, Иванова 1997).

По мнению других авторов (Минеев, 1994; Акулов и др., 1995; Овчаренко, 1997; Алметов, 1996), вклад минеральных удобрений в загрязнение почв тяжелыми металлами не столь существен. По оценкам (Овчаренко, 1997), при-



менение минеральных удобрений дает 2,5–3,0% загрязнения ТМ. Поступление их в почву с органическими удобрениями (включая осадки сточных вод) может достигать 20–26% общего потока токсичных элементов. При использовании нетрадиционных органических удобрений (компосты из твердых бытовых отходов и осадков сточных вод) риск загрязнения почв многократно возрастает (Витковская, 2005; Витковская, 2012). Наиболее существенный вклад в загрязнение агроэкосистем вносят атмосферные выпадения (Гогмачадзе, 2010).

Поскольку самоочищение почв от ТМ и металлоидов – процесс крайне медленный, важной задачей является контроль скоростей изменения содержания примесных элементов в почве и принятие мер по предотвращению их накопления до опасных уровней концентрации. Эта задача может быть решена в процессе проведения мониторинга экологического состояния земель сельскохозяйственного назначения, результат которого должен быть представлен в виде долгосрочного прогноза экологического состояния агроземов, продуктивности агроэкосистем и качества получаемой продукции. Процедура прогноза экологического состояния агроэкосистем должна предусматривать анализ риска (Витковская, 2013).

### ***1.2.1 Методические подходы к обеспечению экологической безопасности применения мелиорантов***

#### ***1.2.1.1 Нормирование поступления примесных элементов в почву с мелиорантами***

Нормирование поступления химических элементов в почву с удобрениями и мелиорантами возможно в два этапа (Витковская, 2006; Витковская, 2012):

- 1) установление ПДК примесных элементов в веществе, вносимом в почву;
- 2) установление лимитирующих показателей, таких как доза и периодичность внесения вещества.

Во многих странах установлены нормы и стандарты на содержание тяжелых металлов в самих отходах (Сюта, Васяк, 1983). В Российской Федерации нормативы, регламентирующие содержание токсичных элементов в органических удобрениях на основе отходов животноводства (ГОСТ Р 53117-2008) и осадков сточных вод (ГОСТ Р 54651-2011) установлены в соответствии с ги-

гигиеническими нормативами для почв (ГН 2.1.2511-09; ГН 2.1.7.2041-06). В «Технических условиях», регламентирующих применение химических мелиорантов в сельском хозяйстве, как правило, за допустимую концентрацию тяжелых металлов и мышьяка также принимают ПДК (ОДК) для почв.

Применение удобрений и мелиорантов, содержание токсичных химических элементов в которых превышает установленные для почв гигиенические нормативы, возможно только при условии жесткого нормирования доз и периодичности их внесения. Поступление примесных элементов в агроэкосистемы при интенсивном использовании средств химизации должно регламентироваться следующими параметрами (Витковская, 2012):

- 1) концентрация примесного элемента в удобрении,  $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ ;
- 2) концентрация примесного элемента в почве,  $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ ;
- 3) буферная способность почвы (гранулометрический состав, рН и содержание гумуса);
- 4) доза внесения удобрения,  $\text{т}\cdot\text{га}^{-1}$  или  $\text{кг}\cdot\text{га}^{-1}$ ;
- 5) периодичность внесения удобрений, годы;
- 6) скорость перехода элемента в системе удобрение - почвенный раствор;
- 7) коэффициенты накопления элемента растениями;
- 8) скорость самоочищения почвы (константы выноса растениями и водами).

Одним из основных параметров, который необходимо учитывать при определении ориентировочных периодов очищения почвы от примесных элементов, поступивших с органическими удобрениями и химическими мелиорантами, является скорость высвобождения химических элементов в процессе трансформации веществ, внесенных в почву. При этом необходимо также оценивать скорости распределения химических элементов по структурным компонентам системы «почва – почвенный раствор – поверхностные и грунтовые воды – растения» (Витковская, 2005; Витковская, 2012).

Алгоритм вычислений допустимой дозы внесения органических удобрений и мелиорантов, содержание токсичных компонентов в которых может представлять опасность для человека и окружающей среды (Витковская, 2006; Витковская, 2012):

1) Допустимую дозу внесения органического удобрения или химического мелиоранта в почву рассчитывают по формуле:

$$ДД = (0,8 ПДК_{п} - C_{фон}) M_{п} / (C - C_{фон}) T,$$

где ДД – допустимая доза внесения, т·га<sup>-1</sup> сухой массы; ПДК<sub>п</sub> – предельно допустимая концентрация микроэлемента в почве, С<sub>фон</sub> – концентрация микроэлемента в почве до внесения удобрения (мелиоранта), мг·кг<sup>-1</sup> сухой массы, M<sub>п</sub> – масса пахотного слоя почвы, т·га<sup>-1</sup>; С – валовое содержание микроэлемента в удобрении, мг·кг<sup>-1</sup> сухой массы; Т – количество лет, в течение которых ежегодно планируется вносить удобрение (мелиорант).

2) Устанавливают длительность (Т) внесения удобрений в интервале 1–10 лет.

3) Выбирают величину M<sub>п</sub>: для суглинистых и глинистых почв – 3000 т·га<sup>-1</sup>, для песчаных и супесчаных почв – 2500 т·га<sup>-1</sup>.

4) По данным химического анализа состава удобрений (мелиорантов), выбирают тяжелые металлы с наибольшим превышением концентраций (С) над ПДК<sub>п</sub> (ОДК).

5) Величину ПДК<sub>п</sub> (ОДК) выбирают в зависимости от гранулометрического состава и кислотности почв (ГН 2.1.2511-09).

6) Лимитирующей считается наименьшая доза из полученных значений ДД.

7) Выбранное (наименьшее) значение ДД пересчитывают на влажную массу по формуле:

$$Д = ДД \cdot 100 / (100 - V),$$

где Д – ДД с учетом влажности т·га<sup>-1</sup>; V – влажность удобрения, %.

Допустимая доза внесения (ДД) рассчитывается для каждого из тяжелых металлов, концентрация которого в мелиоранте выше, чем ПДК для почвы. Лимитирующей считается наименьшая доза из полученных значений ДД.

Расчет значения ДД может быть затруднен в случае отсутствия утвержденных нормативов содержания примесного элемента в почве. В частности, не установлены значения ПДК (ОДК) содержания стабильного Sr в почвах. В данном случае можно ориентироваться на кратность увеличения фоновых значений концентраций элемента в почве при использовании содержащих данный

элемент в повышенных количествах мелиорантов или удобрений (конверсионный мел, фосфогипс, сланцевая зола, буроугольная зола, суперфосфат, фосфоритная мука). В работе (Ковальский, 1978) показано, что верхней границей нормальной концентрации валового стронция в почвах является  $600 \text{ мг} \cdot \text{кгт} \cdot \text{га}^{-1}$  почвы. Этот норматив представляет собой удвоенное кларковое содержание стронция в почвах. При оценке стронциевого загрязнения почв предложено также обращать внимание на отношение валовых содержаний Ca и Sr в почвах. Согласно (Ковальский, 1978), в районах, где не проявляется урвская болезнь, это соотношение должно быть не ниже 10:1. Подробный анализ существующих нормативов содержания стабильного стронция в почвах и растениях приведен А. В. Лаврищевым (2016).

Поводя итог сказанному выше, экологическую безопасность применения удобрений можно регламентировать по следующим основным критериям:

1) Безопасность химического состава удобрений (содержание примесных химических элементов в составе удобрений). Например (Минеев, 2004), в фосфоритной муке содержится 2–3% фтора и 1,2–1,7% стронция; в суперфосфате – соответственно 1,2–2,7 и 1%, а также ряд других элементов.

2) Экологически безопасные дозы применения удобрений.

3) Экологически безопасные технологии применения удобрений (регламентирование доз по конкретную сельскохозяйственную культуру, периодичности внесения, равномерности внесения в пределах поля).

4) Возможное негативное влияние на качество структурных компонентов агроэкосистемы и сопредельных сред вследствие применения удобрений. Например: подкисление почвы при применении физиологически кислых минеральных удобрений; поступление биогенных элементов в водные экосистемы; загрязнение продукции экотоксикантами и др.

5) Пролонгированность воздействия удобрений на качество структурных компонентов агроэкосистемы и сопредельных сред.

### ***1.2.1.2 Анализ риска изменения экологического состояния агроэкосистем***

Экологическая безопасность химических мелиорантов может быть оценена на основе результатов анализа риска их влияния на структурные компоненты агроэкосистемы и здоровье человека.

Методология анализа риска включает два блока: оценку и/или анализ риска и управление риском. Задача 1-го блока – идентификация опасностей, оценка воздействия и его последствий, характеристика риска. Задача 2-го блока – разработка рекомендаций по снижению и контролю риска (Быков, Порфирьев, 2006).

Методология анализа риска является наиболее надежным аналитическим инструментом, позволяющим определять и количественно оценивать различные виды риска, что дает возможность производить ранжирование источников и факторов опасности по степени их значимости и тем самым обозначать приоритеты управления риском и возможностей его минимизации (Быков, 2005).

Риск (R) – это вероятность (P) реализации опасности, или ожидаемая величина ущерба (Y), связанного с каким-либо действием. Обычно его представляют выражением (Исидоров, 1999).

$$R = P \cdot Y.$$

Объектами, на защиту которых направлена оценка риска, являются: 1) человек; 2) животные; 3) растения; 4) экосистемы; 5) функции и свойства окружающей среды (Быков, Мурзин, 1997).

В процессе функционирования агроэкосистем происходит закономерное изменение качественного состава агроземов, продукции растениеводства и животноводства. В зависимости от направленности воздействия, изменения могут носить как позитивный, так и негативный характер. Вероятность негативных изменений, в частности загрязнения агроземов и сельскохозяйственной продукции примесными элементами (тяжелыми металлами и металлоидами), возрастает в процессе интенсификации сельскохозяйственного производства (прежде всего, увеличения доз и ассортимента агрохимикатов, с которыми в почву поступают примесные элементы) (Витковская, 2013).

Структура анализа риска изменения экологического состояния агроэкосистем представлена в работах (Витковская, Хофман, 2011; Витковская, 2013; Витковская, 2013). Под агроэкологическим риском следует понимать вероятность негативных изменений в агрофере под воздействием антропогенных или природных факторов и ожидаемую величину ущерба. В данном случае под антропогенным воздействием понимается весь комплекс мероприятий, применяе-

мых при создании и поддержании агроэкосистемы (обработка почвы, применение агрохимикатов, осушение, орошение и др.), а также атмосферные выпадения, которые могут привести к подкислению и загрязнению почвы радионуклидами и тяжелыми металлами. При этом может оцениваться вероятность развития почворазрушающих процессов, загрязнения агроземов, урожая сельскохозяйственных культур и водоемов экотоксикантами и т.д. Ущерб от ухудшения экологического состояния агроэкосистем можно оценить по недополученной прибыли вследствие деградации агроресурсов. Он может быть также связан с сокращением продолжительности жизни людей вследствие употребления загрязненных продуктов питания и затратами на лечение и социальные выплаты (Витковская, Хофман 2011).

Возрастание доз агрохимикатов возможно до определенного предела, определяющего емкость агроэкосистемы по отношению к веществам, вносимым в почву, и безопасность продукции, получаемой в данной агроэкосистеме. Этот предел возможно установить только по результатам оценки экологического риска, связанного с использованием агрохимикатов. Изменение качественного состава пахотных почв происходит также в зонах воздействия крупных промышленных объектов, автомагистралей и радиационно-опасных объектов (Витковская, Хофман 2013).

Основными составляющими структуры оценки риска загрязнения агроэкосистем являются (Витковская, Дричко, 2012; Витковская, Хофман, 2012; Витковская, 2013):

- 1) оценка текущего экологического состояния агроэкосистемы;
- 2) оценка степени изменения экологического состояния почвы за период освоения и эксплуатации агроэкосистемы;
- 3) прогноз экологического состояния агроэкосистемы с учетом интенсификации сельскохозяйственного производства;
- 4) оценка риска здоровью, связанного с возможным изменением качества сельскохозяйственной продукции;
- 5) прогноз изменения уровня воздействия агроэкосистемы на сопредельные среды.

Для оценки риска возрастания концентраций ТМ и металлоидов в агроземах необходимо установить:

- 1) содержание ТМ в агроземе на текущий момент времени;
- 2) содержание ТМ в нативной почве прилегающих массивов (принимается как фоновая концентрация);
- 3) длительность использования данной почвы в сельскохозяйственном производстве, лет.

Зная эти параметры, можно рассчитать примерную скорость накопления тестируемых химических элементов в почве ( $\text{мг} \cdot \text{кгт} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{годт} \cdot \text{га}^{-1}$ ). При этом концентрация элемента в нативной почве принимается за начальную концентрацию ( $C_0$ ), а концентрация элемента на текущий момент – за максимальную концентрацию. Для расчета может быть использована линейная модель. Эта задача существенно облегчается, если имеются результаты промежуточных агрохимических обследований. Для более точной интерпретации полученных результатов желательно знать, какие удобрения и в каких дозах вносили. Эта информация необходима, с одной стороны, для количественной оценки возможного поступления ТМ с удобрениями, с другой – для количественной оценки выноса их из почвы растениями и водами за рассматриваемый период. На основании полученных результатов анализа данных можно прогнозировать дальнейшее изменение концентраций примесных элементов в почве при различных уровнях химизации (Витковская, 2013).

Для оценки риска загрязнения агроэкосистем необходимо также установление коэффициентов накопления ( $KH$ ) примесных элементов различными сельскохозяйственными культурами. Величина  $KH$  представляет собой отношение содержания элемента в растениях к его содержанию в почве и зависит от буферной способности почвы, содержания элемента в почве, свойств химического элемента, видовых и сортовых особенностей растений. Информация о величинах коэффициентов накопления химических элементов растениями необходима для прогнозирования изменения качества и безопасности сельскохозяйственной продукции. Подобные исследования необходимы для оценки риска здоровью, связанному с интенсификацией сельскохозяйственного производства (Витковская, Хофман, 2011).

В связи с интенсификацией сельскохозяйственного производства агроэкологический риск возрастает, и этот процесс можно представить, используя метод «дерево событий» (рис. 1), широко применяемый при риск-анализе. Основные составляющие агроэкологического ущерба представлены на рис. 2. (Витковская, 2013).

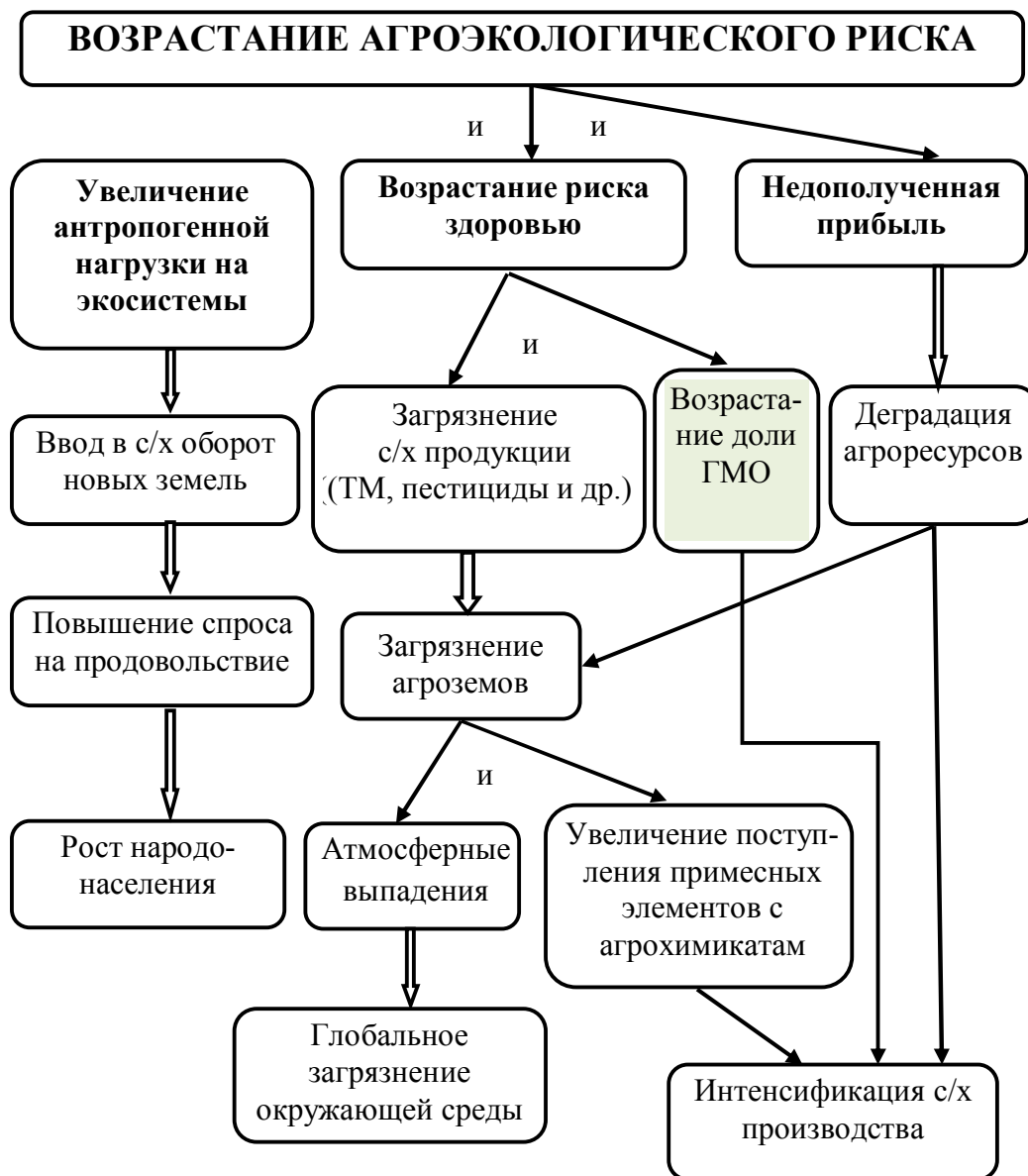


Рис. 1. Дерево возрастания агроэкологического риска (Витковская, 2013)



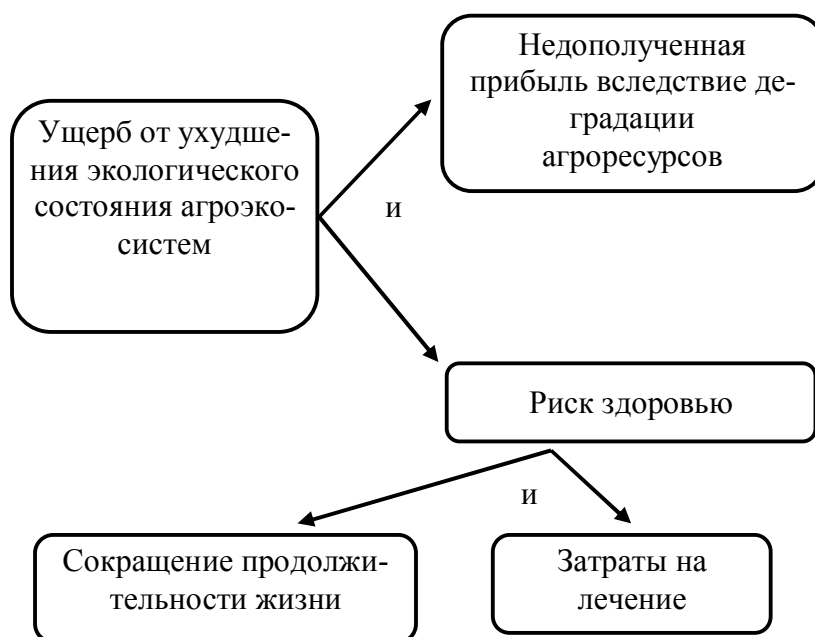


Рис. 2. Составляющие агроэкологического ущерба (Витковская, 2013)

Скорость изменения качественного состава агроземов будет зависеть от трех основных параметров (Витковская, Хофман, 2013):

- 1) Интенсивность поступления загрязняющих веществ в почву с удобрениями, мелиорантами, атмосферными выпадениями ( $\text{г}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ ).
- 2) Скорость выноса ( $V$ ) примесных элементов растениями и водами, которую можно представить уравнением факторов, определяющих вынос элементов из почвы:

$$V = f(W, B, (Y, KH)),$$

где  $V$  – вынос элемента с водами и растениями за период времени  $t$ ;  $W$  – водный режим почв;  $B$  – буферная способность почв;  $Y$  – урожайность сельскохозяйственных культур;  $KH$  – коэффициенты накопления химических элементов растениями (отношение концентрации элемента в растениях к концентрации в почве).

- 3) Длительность использования конкретной почвы в сельскохозяйственном производстве, лет.

Прогноз изменения качественного состава агроэкосистем может быть только адресным – по отношению к определенной территории, характеризующейся однотипными почвенно-климатическими условиями. Важным условием является знание агрономической истории данной территории.

Конечная цель прогноза экологического состояния агроэкосистем – обеспечение продовольственной безопасности на основе долгосрочного прогноза изменения качества сельскохозяйственной продукции в процессе интенсификации сельскохозяйственного производства и оценки риска здоровью от употребления такой продукции (Витковская, Хофман, 2013).

Для расчета рисков здоровью, обусловленных присутствием в пище экотоксикантов, необходимо знать: 1) концентрацию химического элемента в продукте питания; 2) среднее количество потребляемого продукта,  $\text{кг}\cdot\text{год}^{-1}$ ; 3) продолжительность употребления в пищу продукта; 4) пороговую мощность дозы металла.

Рациональные нормы потребления пищевых продуктов устанавливаются и утверждаются Минздравом РФ и могут быть использованы при оценке риска. Единица мощности пороговой дозы ( $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{сут}^{-1}$ ) связана с зависимостью воздействия поступающего в организм токсиканта от массы тела. Перед тем как зафиксировать значение этой дозы для людей, проводятся опыты на различных видах животных (Ваганов, 2008).

Агентством по охране окружающей среды США отработаны алгоритмы и фиксированные показатели для расчета риска здоровью (Ваганов, 2008; <http://epa.gov/iris>). Среднесуточное поступление токсиканта с пищей, приведенное на 1 кг массы тела, рассчитывается по формуле:

$$m = \frac{C \cdot M \cdot T_p}{P \cdot T},$$

где  $C$  – концентрация токсиканта в пищевом продукте,  $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ ,  $M$  – количество продукта, потребляемое за 1 год,  $T_p$  – количество лет, которое потребляется продукт;  $P$  – масса тела (принимается 70 кг);  $T$  – усредненное время воздействия токсиканта – (или средняя продолжительность возможного воздействия токсиканта за время жизни человека, принимаемое равным 30 годам (10 950 суток)).

Затем рассчитывается величина, называемая индексом опасности (HQ):

$$HQ = \frac{m}{H_D},$$

где  $H_D$  – пороговая мощность дозы,  $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{сут}^{-1}$ ;  $m$  – среднесуточное поступление токсиканта с пищей.

Если  $HQ < 1$ , то опасности для здоровья, связанной с неканцерогенными эффектами, нет. Если  $HQ > 1$ , то существует опасность, которая тем больше, чем больше  $HQ$  превышает 1.

Если в продуктах, воде или воздухе содержится несколько токсикантов, то полный индекс опасности равен сумме индексов опасности отдельных компонентов. Опасности нет, если сумма  $HQ$  не превышает 1:

$$HQ_p = HQ_1 + HQ_2 + HQ_3 + \dots + HQ_n < 1.$$

Расчет индексов опасности позволяет выявить, например, существует ли риск здоровью при длительном употреблении продуктов питания с содержанием тяжелых металлов и мышьяка на уровне установленных в России ПДК.

В качестве примера приведем рассчитанные нами показатели характеристики риска угрозы здоровью при поступлении кадмия и мышьяка в организм человека с картофелем (Витковская, Хофман, 2013). Расчет проводили по представленным выше формулам, принимая, что количество данных продуктов, потребляемых за год, приближено к рекомендуемым в РФ нормам и составляет  $100 \text{ кг год}^{-1}$  (табл. 3).

**Таблица 3. Показатели характеристики риска угрозы здоровью при поступлении кадмия и мышьяка в организм человека с картофелем (Витковская, Хофман, 2013)**

Показатель	Количество лет, в течение которых употребляется продукт				
	1 год	10 лет	20 лет	30 лет	40 лет
<b>Кадмий</b>					
<b>HQ</b> при $C(\text{Cd}) = \text{ПДК}$	0,0039	0,039	0,078	0,12	0,156
$S_{\text{max}}$ , $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ , при которой $HQ < 1$ ПДК Cd в картофеле – $0,03 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$	7,5	0,75	0,38	0,25	0,19
<b>Мышьяк</b>					
<b>HQ</b> при $C(\text{As}) = \text{ПДК}$	0,087	0,87	<b>1,74</b>	<b>2,6</b>	<b>3,48</b>
$S_{\text{max}}$ , $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ , при которой $HQ < 1$ ПДК As в картофеле – $0,2 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$	2,25	0,225	0,11	0,075	0,057

Согласно (<http://epa.gov/iris>), значения пороговых мощностей доз ( $H_D$ ), отвечающих за формирование неканцерогенных эффектов для Cd и As при поступлении их с пищей составляют  $1 \cdot 10^{-3}$  и  $3 \cdot 10^{-4}$   $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$  соответственно. Результаты расчетов показали (табл. 3), что ПДК кадмия для картофеля соответствует нормам безопасности. При употреблении в пищу картофеля с содержанием кадмия на уровне ПДК в течение 40 лет, риск здоровью по неканцерогенным эффектам отсутствует ( $HQ \ll 1$ ) (Витковская, Хофман, 2013).

МДУ мышьяка для картофеля не соответствует санитарным нормам: употребление в пищу картофеля с концентрацией As  $0,2 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$  более десяти лет опасно для здоровья (табл. 3). При регулярном употреблении в пищу этого продукта концентрация мышьяка в нем не должна превышать  $0,06 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ , что в 3,5 раза ниже установленных в РФ норм.

### **1.3 Критерии оценки эффективности и экологической безопасности известковых мелиорантов**

#### ***1.3.1 Отличительные особенности применения известковых мелиорантов***

Специфика приема известкования, по сравнению с другими приемами повышения плодородия почв (за исключением внесения органических удобрений) проявляется в следующем:

1) По сравнению с минеральными удобрениями, количество поступающего в почву с известковыми мелиорантами действующего вещества ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ), несоизмеримо выше: доза мелиоранта исчисляется в  $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$ . Как следствие – многократно возрастает воздействие на агроэкосистему, физические, химические, биологические свойства почвы.

2) Продолжительность изменения кислотно-основных свойств почвы в процессе взаимодействия известкового мелиоранта с почвой определяется дозой, нейтрализующей способностью и фракционным составом мелиоранта, составом и свойствами почвы (Шильников и др., 2008; Небольсин, Небольсина, 2010). Действие мелиоранта может проявляться в течение 15–20 лет и более (Шильников и др., 2008).

3) При внесении в почву известковых мелиорантов, помимо нейтрализации почвенной кислотности и насыщения почвенного поглощающего комплекса основаниями, происходит усиление конкурентных взаимодействий между

Ca, Mg и их химическими аналогами, приводя к изменению элементного состава почвенного раствора и растений (Витковская и др., 2016). Степень воздействия на систему «почва – растение» зависит от дозы мелиоранта.

4) Изменение реакции почвы и насыщения ППК кальцием и магнием может приводить к дефициту необходимых для растений и человека микроэлементов. На территориях, характеризующихся недостаточным содержанием микроэлементов, известкование можно рассматривать как дополнительный фактор риска для здоровья населения. Известно (Самофалова, 2009), что в Таежно-лесной нечерноземной зоне, реакции живых организмов обусловлены недостатком кальция, фосфора, кобальта (73% всех почв), меди (70%), йода (80%), молибдена (53%), бора (50%), цинка (49%), оптимальным содержанием марганца (72%), относительным избытком, особенно в поймах рек, стронция (15%).

5) Эффективность известкования существенно зависит от конкретных условий и отношения различных сельскохозяйственных культур к почвенной кислотности (Шильников и др., 2010), результаты исследований могут существенно варьироваться в зависимости от почвенно-климатической зоны и генетически обусловленных особенностей растений.

### ***1.3.2 Основные виды известковых мелиорантов и их экологическая безопасность***

По объему годовой добычи, а также по экономической значимости карбонатное сырье в группе неметаллов стоит в ряду ведущих. К широко распространенным карбонатным породам, сложенным кальцитом и (или) доломитом, относятся известняк, мел, доломит, мрамор, мергель, доломитовая мука, известковый туф, гаж. К карбонатным породам относятся также магнезиты и сидериты (Методические рекомендации..., 2007). По соотношению кальцита и доломита среди известково-доломитовых пород выделяются: известняк – при содержании кальцита 100–95%, известняк доломитистый – 95–75%, известняк доломитовый – 75–50%, доломит известковый – 50–25%, доломит известковистый – 25–5% и доломит – 5–0% кальцита (и 95–100% доломита). В структуре использования карбонатных пород в России, добыча для известкования кислых почв составляет всего 2,3% (Методические рекомендации..., 2007).

По данным на 2017 год, на территории Российской Федерации разрешены к применению известковые материалы, представленные в таблице 4 (Государственный..., 2017).

Для нейтрализации кислых почв широко применяется известняковая (доломитовая) мука, получаемая измельчением карбонатных пород или отсеков их дробления при производстве щебня. Мука в зависимости от прочности карбонатной породы (ГОСТ 14050–93) подразделяется на четыре класса, по зерновому составу на три марки (А, В, С), по массовой доле влаги марка А делится на две группы. Допустимая минимальная суммарная массовая доля карбонатов кальция и магния должна составлять не менее 80% для пород 1-го и 2-го классов (с прочностью до 40 МПа) и не менее 85% для пород 3-го и 4-го классов (с прочностью более 40 МПа). Зерновой состав муки определяется маркой и классом, но везде должны преобладать зерна размером менее 1 мм, а зерна размером более 3–5 мм допустимы в ограниченных количествах. Более прочные породы требуют более тонкого помола (Методические рекомендации..., 2007). В одном килограмме мелиоранта содержится до 25 г кремния, 400 мг марганца, до 800 мг стронция, до 1 г серы, а также хлор, фтор, железо и ряд других элементов (Эколого-экономические..., 2000).

На удобрения известковые местные из известняков, доломитов и мергелей были разработаны ТУ 2189-326-00008064–99. В зависимости от прочности известняков и доломитов, удобрения подразделяются на три класса (до 20, 20–40 и свыше 40 МПа). Количество  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$  во 2-м и 3-м классах должно быть не менее 80%. Массовая доля влаги не должна превышать 15%. Преобладающий размер зерен должен быть менее 3 мм, содержание зерен размером более 5 мм ограничено – 5–10%. Для мела, озерной извести, мергеля, известкового туфа суммарная доля углекислого кальция и углекислого магния должна быть в пределах 50–85% (Методические рекомендации..., 2007).

Таблица 4. Мелиоранты почвы известковые, разрешенные к применению на территории Российской Федерации таблице (Государственный..., 2017)

Название (марка)	Производитель
(С), Белит марки: Б-1, Б-2	ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат»
(С), Доломитовая мука	ООО «БалтТрейдХим»
(ЛС), Доломитовая мука	ООО «Щебсервис»
(Л, С) Доломитовая мука	ООО «ГД «ДОЛОМИТ»
(ЛС), Известняковая мука	ООО «Удмуртагрохим»
(ЛС), Известняковая мука марка А класс 2	ООО «Костенецкий карьер»
(С), Известняковая мука, марка С, 2 класса	ИП Моисеев Юрий Николаевич
(ЛС), Известняковая мука местная	ОАО «Агрохим»
(ЛС), Известь натуральная «Экостайл»	Компания Экостайл Б.В.
(С), Карбонат кальция для сельского хозяйства	АО «МИНУДОБРЕНИЯ», г. Россошь
(С), Карбонат кальция конверсионный марка	ОАО «Дорогобуж»
(ЛС), Мука доломитовая, марки А и С	ОАО «Доломит» (Липецкая обл.)
(ЛС), Мука известняковая	МУП Илишевская «Сельхозхимия»
(С), Мука известняковая	Канашское ТПУ ОАО «Чувашавтодор»
(С), Мука известняковая	ОАО «Яманчуринская сельхозхимия»
(Л, С) Мука известняковая марка А	ООО «Дробильно-сортировочный завод»
(С) Мука известняковая, марка А	ОАО «Теплоозерский цементный завод»
(С), Мука известняковая (доломитовая)	ОАО «Старорусская сельхозхимия»
(С), Мука известняковая (доломитовая)	ООО «Карбон»
(С), Мука известняковая (доломитовая)	ОАО Производственно-строительная фирма «ТВ-Пресс»
(С) Мука известняковая (доломитовая)	ООО «Вайда»
(Л, С) Мука известняковая (доломитовая)	ООО «М1 ЛОГИСТИКА»
(ЛС), Мука известняковая (доломитовая) марка А	ОАО «Песковский комбинат строительных материалов»
(С), Мука известняковая (доломитовая) марка С	ОАО «Чимбулатский карьер»
(ЛС), Удобрения известковые: мука известняковая, известь-ушонка	ОАО «Урализвесть»
(ЛС), Удобрения известковые местные (мергель, известняковая мука, доломитовая мука)	ОАО «Татагрохим»
(ЛС), Удобрения известковые местные (мука известняковая, туф известковый, известь озерная)	ООО «Агрохимсервис»
(С), Фосфогипс для сельского хозяйства	ООО «Балаковские минеральные удобр.»
(С), Фосфогипс для сельского хозяйства	АО «Воскресенские минеральные удобр.»
(С), Фосфогипс для сельского хозяйства	ООО «ЕвроХим-Белореченские Минудобрения»
(С), Фосфогипс для сельского хозяйства	АО «Невинномысский Азот»
(С) Фосфогипс для сельского хозяйства	ОАО «Мелеузовские минеральные удобрения»
(С) Фосфогипс для сельского хозяйства	АО «ФОСАГРО-ЧЕРЕПОВЕЦ»
(С) Фосфогипс для сельского хозяйства	АО «АПАТИТ»

**Примечание:** С – разрешен для применения только в сельскохозяйственном производстве; ЛС – разрешен для применения в сельскохозяйственном производстве и в личных подсобных хозяйствах; Л – разрешен для применения только в личных подсобных хозяйствах

К местным известковым удобрениям относятся (Эколого-экономические..., 2000):

1) Гажа – озерная известь, состоит в основном, из углекислого кальция, пригодна для мелиорации кислых почв после предварительной подготовки (подсушивания и просева).

2) Известковые туфы – (ключевая известь), продукты накопления углекислого кальция в водных источниках. Суммарная доля углекислого кальция и углекислого магния не менее 80% на сухое вещество.

3) Луговой мергель. Суммарная доля углекислого кальция и углекислого магния составляет не менее 70% и 50% на сухое вещество для первого и второго сортов, соответственно.

4) Карбонат кальция химического синтеза (конверсионный мел). В его составе содержится фтор и стронций, в количествах, представляющих опасность для окружающей среды – до 0,3 и 1,8%, соответственно. В настоящее время не применяется.

5) Metallургические шлаки (доменные, мартеновские и электроплавильные). Их применения ограничено из-за повышенного содержания тяжелых металлов.

6) Зола горючих полезных ископаемых (торфяная, сланцевая и каменноугольная). Загрязнена солями тяжелых металлов. Значительные объемы сланцевой золы поставлялись Эстонской и Прибалтийской ГРЭС, содержится до  $260 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$  стронция. С 1993 года поставки мелиоранта прекращены (Лаврищев, 2016). Буроугольная зола характеризуется повышенными концентрациями микроэлементов: бор, селен, кобальт, цинк, медь, молибден, хром и др. Среди особо опасных элементов в золе содержатся мышьяк, кадмий, свинец и др. (Кузьмич, 2004).

7) Отходы дорожного строительства – образуются при производстве щебенки из карбонатного сырья. В отвалы отсеиваются фракции менее 20 мм. В качестве мелиоранта могут применяться после доработки.

Metallургические шлаки ранее широко применялись в качестве мелиорантов в Уральском районе: ферропонтонный шлак (ФХШ) Челябинского и Серовского металлургических комбинатов, доменный и мартеновский шлаки



Нижнетагильского комбината (НТМК) и электроплавильный шлак Екатеринбургского комбината (Игамбердиев, Огородников, 1994). Эта группа мелиорантов содержит ряд тяжелых металлов (табл. 5).

Качество химического мелиоранта определяется качеством исходного сырья и характеризуется нейтрализующей способностью, фракционным составом и безопасностью элементного состава. В Российской Федерации отсутствуют нормативы, регламентирующие содержание примесных элементов в химических мелиорантах. Содержание экотоксикантов в мелиоранте считается допустимым, если не превышает предельно допустимых значений, установленных (ГН 2.1.7.2041-06; ГН 2.1.2511-09) для почв сельскохозяйственного назначения. Если содержание примесных элементов в мелиоранте превышает установленные для почв ПДК (ОДК), использование его для повышения плодородия почв возможно только при условии нормирования доз и периодичности внесения (Витковская, 2006; Витковская, 2012).

Таблица 5. Химический состав металлургических шлаков, %  
(Игамбердиев, Огородников, 1994)

Показатель	Вид шлака			
	электросплав	ФХШ	НТМК доменный	НТМК мартековский
CaO	50,6	54,6	29,2	12,5
MgO	8,0	9,0	5,2	16,2
SiO <sub>2</sub>	24,7	26,5	41,9	28,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,8	3,6	11,4	6,1
MnO	0,03	0,4	0,6	3,0
Fe	0,28	0,7	4,4	15,3
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5	6,5	1,8	1,7
F	1,77	0,3	0,3	0,6
TiO <sub>2</sub>	0,53	0,26	1,8	1,1
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,25	0,15	0,6	0,3

Известняковая мука, доломитовая мука, гажа и туфы не загрязняют почвы тяжелыми металлами. К применению промышленных известьесодержащих отходов, особенно металлургических шлаков, следует относиться с повышенной осторожностью (Небольсин, Небольсина, 2010).

В таких традиционных мелиорантах, как доломитовая и известняковая мука, суммарная массовая доля карбонатов кальция и магния составляет, в зависимости от марки), не менее 80–85% (ГОСТ 14050-93), а содержание примес-

ных элементов не превышает установленных гигиенических нормативов для почв (4 класс опасности). Так, мука известняковая (доломитовая) производимая в Белоруссии (ООО «М1 Логистика») содержит 94,2% карбонатов кальция и магния и соответствует требованиям безопасности (табл. 6). Эффективная удельная активность радионуклидов в агрохимикате существенно ниже норм, установленных для материалов 1-го класса в соответствии с (НРБ 99/2009), согласно которым, эффективная удельная активность природных радионуклидов в удобрениях не должна превышать  $370 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ , техногенных ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ) –  $1,0 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$  (Материалы оценки..., 2014).

**Таблица 6. Содержание тяжелых металлов в муке доломитовой ООО «М1 Логистика», (Материалы оценки..., 2014)**

Показатель	Содержание фактическое,	Норма по НД, не более,
	$\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$	$\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$
Свинец	3,5	32,0
Кадмий	0,08	0,5
Мышьяк	2,0	< 0,05
Ртуть	2,1	< 0,02

Белит – основная минеральная добавка для цемента. Представляет собой светло-серый тонкомолотый порошок (фракция до 0,4 мм). Это двухкальциевый силикат  $2\text{CaOSiO}_2$  с содержанием 1–3% примесей и включений в виде оксидов железа, алюминия, магния, хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) и др., составляет совместно с ними твердый раствор. Согласно (ТУ 14-139-201-2012), по показателям качества должен соответствовать нормам, указанным в таблице 7. Этот разрешенный к применению нетрадиционный химический мелиорант по степени токсичности относится к 3-му классу опасности, является потенциальным источником загрязнения почв хромом.

**Таблица 7. Показатели качества белита (ТУ 14-139-201-2012)**

Наименование показателя	Норма для марки	
	Б-1	Б-2
Массовая доля оксида кальция, %, не менее	43	
Массовая доля оксида кремния, %	24–32	
Массовая доля оксида хрома, %, не более	8	
Массовая доля влаги, %, не более	1,5	
Остаток на сите с сеткой 0,125 мм, %, не более	10,0	–
Остаток на сите с сеткой 0,5 мм, %, не более	–	3,0

Загрязнение почв сельхозугодий стабильным стронцием возможно при использовании фосфогипса для мелиорации засоленных почв. Стронций – элемент III класса опасности в почве. Повышенные концентрации стронция в организме животных и человека приводят к различным заболеваниям опорно-двигательной системы (Лаврищев, 2016).

Фосфогипс является основным средством химической мелиорации солонцовых почв и составляет 87% всех поставок гипсосодержащих материалов сельскому хозяйству (Лаврищев, 2016). Фосфогипс, используемый в сельском хозяйстве, в соответствии с (ТУ 113-08-418-94) должен соответствовать показателям, приведенным в таблице 8. По своим характеристикам он подразделяется на два класса, которые, имея одинаковую долю основного вещества ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), различаются по гранулометрическому составу и гигроскопической влажности (Теория и практика..., 2016).

Таблица 8. Показатели качества фосфогипса, применяемого в сельском хозяйстве (ТУ 113-08-418-94)

Показатель	Значение	
	1-й сорт	2-й сорт
Содержание $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в пересчете на сухой дигидрат, %	$\geq 92$	$\geq 92$
Содержание гигроскопической воды, %	$\leq 6$	$\leq 20$
Содержание водорастворимых фтористых соединений, в пересчете на фтор, %	0,4	0,3
Массовая доля частиц (комков) размером:		
$> 10 \text{ мм}^*$	отсутствие	отсутствие
5–10 мм	$\leq 1$	$\leq 20$
$> 1 \text{ мм}$ , не более	$\leq 6$	не нормируется
Содержание кадмия, мышьяка, ртути, свинца и других токсичных элементов, %	должно выдерживать требования безопасности и охраны окружающей среды	

**Примечание:** При расчете доз фосфогипса его частицы крупнее 10 мм следует считать балластом.

Химический состав фосфогипса позволяет квалифицировать его как поликомпонентное минеральное удобрение (табл. 9).

Таблица 9. **Химический состав фосфогипса нейтрализованного**  
(Теория и практика..., 2016)

Показатель	Содержание, % воздушно-сухой массы	Показатель	Содержание, % воздушно-сухой массы
MgO	0,025	Mn	0,001
SiO <sub>2</sub>	0,98	Ni	0,0002
P <sub>общ.</sub> (по P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2,0	Cu	0,0008
S (общая)	21,5	Zn	0,0003
K <sub>2</sub> O	<0,001	Y	0,0014
CaO	37,12	Zr	0,0075
TiO <sub>2</sub>	0,007	La	0,02
Cr	<0,001	Ce	0,046

Результаты анализа литературных данных, характеризующих химический состав фосфогипса семи предприятий России Украины и Казахстана, представленные А. В. Лаврищевым (2016), свидетельствуют, что содержание стронция в нем значительно варьируется, составляя 1,8–3,5% в фосфогипсе из апатитов и 0,04–0,06% из фосфоритового сырья. Содержание стронция в удобрениях и мелиорантах не нормируется.

Источниками загрязнения почв сельхозугодий стабильным стронцием являются фосфорные удобрения и химические мелиоранты (в том числе – нетрадиционные). В фосфорных удобрениях содержание стабильного стронция составляет от 25 до 500 мг·кг<sup>-1</sup> (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

В традиционных мелиорантах содержание стабильного стронция невелико. К загрязнению почв этим химическим элементом может приводить применение в качестве известковых мелиорантов отходов промышленности (конверсионный мел, сланцевая зола, бурогольная зола) (Лаврищев, 2016).

Содержание примесных элементов в различных удобрениях может в десятки и сотни раз превосходить их среднее содержание в почвах. Поэтому в этих случаях химизация сельского хозяйства обязательно сопровождается увеличением концентраций примесных элементов в почве, следовательно, и в сельскохозяйственных растениях и в организме человека (Дричко, 1990).

Снижение содержания необходимых для человека и животных микроэлементов в продукции растениеводства вследствие применения известковых мелиорантов следует рассматривать как один из существенных факторов, опреде-

ляющих экологическую безопасность их применения. Степень возможного влияния известкования на обеспеченность растений микроэлементами можно оценить, основываясь на градации почв по содержанию основных микроэлементов, табл. 10 (Методические указания..., 2003).

**Таблица 10. Группировка почв по содержанию подвижных форм микроэлементов, определяемых в вытяжке ацетатно-аммонийного буферного раствора (рН 4,8) (Методические указания..., 2003)**

Элемент	Градации почв по содержанию микроэлементов, мг·кг <sup>-1</sup>		
	низкое	среднее	высокое
Марганец	менее 10,0	10,0–20,0	более 20,0
Цинк	менее 2,0	2,1–5,0	более 5,0
Медь	менее 0,20	0,21–0,50	более 0,50
Кобальт	менее 0,15	0,16–0,30	более 0,30

Следует также учитывать, что известкование может приводить увеличению подвижности некоторых химических элементов, например – молибдена и хрома. А. Н. Небольсин и З. П. Небольсина (2005), приводят данные, согласно которым в многолетнем опыте под влиянием известкования содержание подвижного молибдена, определяемого в оксалатной вытяжке, возрастало в 1,3–1,4 раза. Известно также, что известкование может приводить к увеличению содержания кадмия в зерне злаковых культур. Данный эффект связывают со спецификой состава их корневых выделений. Допустимый уровень содержания химических элементов в почве устанавливается согласно (ГН 2.1.7.2041-06; ГН 2.1.2511-09). Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов регламентируются СанПиН 2.3.2.1078-01 (с изменениями на текущий год).

Для обеспечения экологической безопасности применения известковых мелиорантов необходимо соблюдение следующих условий:

- 1) Использование химических мелиорантов, разрешенных к применению.
- 2) Контроль качества (элементного состава) мелиоранта. Если в составе мелиоранта содержание одного или нескольких химических веществ превышает значения установленных нормативов для почв, необходимо жестко регламентировать дозы и периодичность его внесения.

3) Мониторинг экологического состояния мелиорированных почв согласно (Методические указания..., 2003).

4) Анализ риска изменения экологического состояния агроэкосистем вследствие применения мелиоранта.

5) Контроль качества продукции растениеводства, анализ риска здоровью от ее употребления.

### ***1.3.3 Критерии оценки эффективности известковых мелиорантов***

Эффект от известкования кислых почв в агроценозе варьируется в широком диапазоне в зависимости от свойств почвы, дозы и физико-химических свойств мелиоранта, генетически обусловленных особенностей растений. Дать качественную и количественную оценку эффективности различных доз химического мелиоранта и сопряженных с ними кислотно-основных свойств известкованных почв, влияющих на продуктивность и элементный состав сельскохозяйственных культур, позволяют результаты исследований, полученные в экспериментах с широким диапазоном доз мелиоранта. Изучение закономерностей распределения макро- и микроэлементов в системе почва-растение в зависимости от дозы мелиоранта необходимо для возможности прогнозирования элементного состава растений при известковании кислых почв, снижению риска получения несбалансированной по микроэлементному составу продукции растениеводства.

Методические основы определения степени нуждаемости (и очередности) почв в известковании, а также установления оптимальных для конкретной почвы доз извести, изложены в работе (Небольсин, Небольсина, 2005).

Экологический эффект от известкования проявляется в нивелировании негативных изменений в агроэкосистеме при развитии процесса подкисления почв, обусловленных как почвенно-климатическими условиями, так и применением физиологически кислых минеральных удобрений.

Эффективность приемов известкования кислых почв определяется степенью достижения результатов при решении следующих задач:

- 1) Оптимизация кислотно-основных свойств агроземов.
- 2) Повышение урожайности сельскохозяйственных культур.

3) Повышение качества продукции растениеводства. Например, известно (Минеев, 2004), что на известкованных почвах получают растительную продукцию с содержанием белка на 2–5% выше, чем на кислых. Качество продукции возрастает также за счет иммобилизации в почве токсических элементов и радионуклидов.

Эффективность мелиоранта можно оценить по следующим показателям, количественно характеризующих результат его применения:

1)  $\Delta pH$  почвы при внесении конкретной дозы мелиоранта,

2) Доза мелиоранта, необходимая для достижения оптимальной реакции почвенной среды.

3) Пролонгированность действия мелиоранта. Доза мелиоранта, обеспечивающая сохранение достигнутого эффекта нейтрализации почвенной кислотности на определенный период времени ( $t$ , годы).

4) Прибавка урожая сельскохозяйственных культур ( $t \cdot га^{-1}$ ). Интервал доз мелиоранта, оказывающих положительный эффект на продуктивность сельскохозяйственных культур.

5) Интервал доз мелиоранта, оказывающих положительное влияние на качество сельскохозяйственной продукции.

6) Интервал доз мелиоранта в конкретных почвенно-климатических условиях, обеспечивающих рентабельность, %, приема известкования.

7) Доход от реализации дополнительного урожая, руб.

Эффективность известкования резко возрастает при длительном применении физиологически кислых минеральных удобрений (Минеев, 2004).

Известкование кислых почв является существенным фактором, влияющим на распределение микро- и ультра- микроэлементов в системе почва-растение. На загрязненных тяжелыми металлами или техногенными радионуклидами почвах может рассматриваться как эффективный прием снижения их биодоступности.

Критерии оценки эффективности известкования на загрязненных почвах:

1) Зависимость содержания подвижных соединений тяжелых металлов в почве от дозы мелиоранта (доза – ответ).

2) Зависимость содержания подвижных соединений тяжелых металлов в почве от времени взаимодействия мелиоранта с почвой (время – ответ).

3) Зависимость содержания тяжелых металлов (радионуклидов) в продукции растениеводства от дозы мелиоранта.

4) Зависимость коэффициентов накопления элементов растениями от дозы мелиоранта и времени взаимодействия их с почвой.

Как справедливо отмечают А. Н. Небольсин и З. П. Небольсина (2005), отличие в подходах к известкованию почв, загрязненных ТМ, от незагрязненных, заключается в том, что, в данном случае, основным критерием оценки результата является не величина урожая, а его гигиеническое качество. Снижение негативного действия ТМ на растительные и микробные ценозы при известковании достигается в результате комплекса следующих физико-химических и биологических процессов, происходящих в почве:

1) снижение доступности ТМ вследствие образования гидроксидов и карбонатов;

2) изменения окислительно-восстановительного потенциала почв;

3) соосаждение ТМ с гидроксидами железа и марганца;

4) антагонистические взаимодействия ТМ с кальцием и магнием при поглощении их из почвы растениями или в самих растениях.

Наиболее выраженное влияние содержания кальция и магния в почве на распределение микроэлементов в системе почва растение следует ожидать в отношении их химических аналогов: стронция, цинка, кадмия и ртути.



## ГЛАВА 2. ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ОПЫТОВ С ИЗВЕСТКОВЫМИ МЕЛИОРАНТАМИ

### 2.1 Основные задачи полевого эксперимента с известковыми мелиорантами

Исходя из изложенного выше, важнейшими задачами, которые должны решаться в процессе проведения полевых экспериментов с известковыми мелиорантами, особенно при испытании новых видов мелиорантов, являются:

1) *Установление доз мелиоранта, которые можно рассматривать как эффективные* по отношению к физико-химическим свойствам почвы и различным видам сельскохозяйственных культур. Эффективность той или иной дозы химического мелиоранта можно оценить по следующим критериям:

- Влияние мелиоранта (в широком диапазоне доз) на урожайность сельскохозяйственных культур. Экспериментальные данные (Минеев и др., 2014) свидетельствуют, что различная чувствительность сельскохозяйственных культур к кислотности почвы обусловлена составом их корневых выделений, изменяющих реакцию среды, а также связана с ферментативной активностью почвы в ризосфере.
- Влияние различных доз мелиоранта на реакцию почвы.
- Влияние различных доз мелиоранта на содержание подвижных соединений алюминия, марганца и железа, которое позиционируется (Небольсин, Небольсина, 2010) как основной фактор снижения урожайности сельскохозяйственных культур на кислых почвах.
- Пролонгированность действия химических мелиорантов на реакцию почвы и содержание обменных оснований в зависимости от дозы, нейтрализующей способности и размера фракций мелиоранта.

2) *Установление доз мелиоранта, которые можно рассматривать как экологически безопасные* по отношению к показателям качества окружающей среды и сельскохозяйственной продукции. Основными критериями, определяющими экологическую безопасность мелиоранта, являются:

- Безопасность элементного состава мелиоранта: если в составе мелиоранта содержание одного или нескольких химических элементов превышает

значения установленных нормативов для почв, необходимо жестко регламентировать дозы и периодичность его внесения.

- Влияние различных доз мелиоранта на содержание подвижных соединений микроэлементов в почве и накопление их в продукции растениеводства. Рекомендуемые к применению дозы мелиоранта не должны приводить к существенному снижению содержания жизненно необходимых химических элементов в растениях.
- Влияние различных доз мелиоранта на рост и развитие растений.
- Влияние различных доз мелиоранта на качественный и количественный состав почвенной микрофлоры. Известно (Небольсин, Небольсина, 2010), что известкование оказывает сильное и длительное действие на состав и численность различных групп почвенных микроорганизмов, на активность почвенных ферментов. На известкованных почвах численность грибной микрофлоры снижается, различных групп бактерий и актиномицетов – возрастает.

## **2.2 Планирование и проведение эксперимента**

Решение указанных выше задач возможно при соблюдении следующих условий планирования эксперимента:

1) *Для оценки эффективности известковых мелиорантов*, эксперименты следует проводить на почвах с кислой реакцией среды. Участок планируемого полевого эксперимента должен соответствовать следующим основным требованиям (Витковская, 2011):

- Почвенная разность должна быть типичной для региона, в котором планируется проводить эксперимент и использовать его результаты.
- Участок должен быть однороден по положению в рельефе, уровню залегания грунтовых вод, строению и мощности почвенного профиля.
- Почвенный покров участка не должен иметь существенных различий по гранулометрическому составу, основным агрохимическим и агрофизическим характеристикам. Исключение составляют эксперименты, целью которых является исследование реакции растений в

условиях естественной или искусственно созданной неоднородности почвенного покрова. В данном случае опытное поле может представлять собой совокупность нескольких ЭПА.

При выборе участка, закладке и проведении полевого эксперимента следует учитывать, что одно из основных отличий полевого эксперимента от других методов исследований – это изучение влияния какого-либо фактора на урожай и качество сельскохозяйственных культур в условиях естественной или искусственно созданной неоднородности показателей плодородия почвы. Пространственное варьирование агрохимических показателей агроземов обусловлено неоднородностью морфогенетических свойств почвы и неравномерностью внесения удобрений. В крупномасштабных полевых опытах, особенно производственных, отсутствие контроля равномерности внесения удобрений также может оказаться существенным фактором, влияющим на вариабельность содержания элементов питания в пределах делянок (Витковская, 2009).

2) **Схема полевого эксперимента** должна включать варианты в широком диапазоне доз мелиоранта. Диапазон тестируемых доз следует начинать с  $0 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$  (контроль). Максимальная доза зависит от конкретных задач исследования, но не должна быть менее  $1,5 \text{ Нг}$ . Минимальное число вариантов (доз) должно быть не менее шести, что позволит построить зависимости «доза – ответ» по любому тестируемому параметру. Если тестируется нетрадиционный мелиорант, анализ на валовое содержание примесных химических элементов является обязательным. Если эксперимент планируется проводить по стандартной методике, повторность 3-кратная. Прецизионные эксперименты проводят без повторностей, достоверность результатов обеспечивается широким диапазоном доз мелиоранта.

Если целью исследования является изучение эффективности и экологической безопасности различных по размеру фракций мелиоранта, то широкий диапазон доз в схеме опыта должен быть введен для каждой тестируемой фракции.

3) **Полевой опыт с химическим мелиорантом** не может быть однолетним. Продолжительность эксперимента должна составлять не менее трёх лет. Соблюдение этого условия позволит построить зависимости «время – ответ»,

оценить изменение скоростей тестируемых параметров и процессов в зависимости от дозы мелиоранта и времени взаимодействия его с почвой.

Построение зависимостей «время – ответ» и «доза – ответ» на основании экспериментальных данных, полученных в длительных полевых опытах в широком диапазоне доз мелиоранта, позволяет выявить закономерности, характеризующие процессы изменения кислотно-основных свойств почвы и распределения макро- и микроэлементов в системе почва-растение при известковании кислых почв (Витковская и др., 2016).

В крупномасштабных полевых опытах, особенно производственных, варьирование параметров плодородия опытного участка может оказаться существенным фактором, влияющим на неоднородность урожайности сельскохозяйственных культур в пределах делянок. Пространственное варьирование агрохимических показателей агроземов обусловлено неоднородностью морфогенетических свойств почвы и неравномерностью внесения удобрений. Критериями оценки неоднородности агрохимических показателей почвы и параметров урожая являются: среднее, минимальное и максимальное значения, стандартное отклонение и коэффициент вариации. Методы оценки неоднородности почвенного покрова при планировании и проведении полевых опытов представлены в работе (Витковская, 2011).

### ***2.2.1 Контролируемые параметры. Результаты эксперимента***

Результаты эксперимента оцениваются на основании анализа экспериментальных данных, полученных в ходе проведения опыта.

#### ***2.2.1.1 Агрохимические параметры почвы***

Экспериментальные данные, характеризующие влияние доз и времени взаимодействия мелиоранта с почвой на агрохимические параметры почвы (кислотно-основные свойства, содержание подвижных соединений тяжелых металлов (микроэлементов) и др.).

Сроки отбора почвенных проб устанавливаются в зависимости от задач проводимого обследования и скорости трансформации веществ, вносимых в почву (Витковская, 2011). Отбор почвенных проб в течение первых 4–5 лет эксперимента проводится два раза в год (весной, до внесения минеральных удобрений, и осенью, после уборки урожая). Далее почвенные пробы можно отби-

рать один раз в год. Анализируемые показатели: рН, гидролитическая кислотность, содержание обменных соединений кальция и магния, содержание свободных карбонатов, содержание подвижных соединений Al, Mn, Fe, Zn, Cu, Co, Mo и др. (перечень устанавливается с учетом решаемых в опыте задач). Валовое содержание указанных химических элементов в почве, а также содержание гумуса, фосфора, калия и азота, определяют в пробах, отобранных до закладки опыта (до внесения удобрений и известкового мелиоранта) с каждой делянки. Экспериментальные данные позволяют установить эффективность и пролонгированность действия конкретной дозы мелиоранта:

- Влияние дозы мелиоранта на контролируемый параметр (зависимость «доза – ответ»).
- Влияние времени взаимодействия мелиоранта с почвой на контролируемый параметр (зависимость «время – ответ»).

Динамика агрохимических параметров почв при внесении мелиорантов зависит от многих факторов (свойства почвы, доза, состав и свойства мелиоранта, климатические условия), поэтому, в зависимости от конкретных условий, может аппроксимироваться различными моделями, которые выбираются в процессе обработки полученных экспериментальных данных.

Для оценки влияния возрастающих доз известковых мелиорантов на кислотнo-основные свойства почвы (зависимость «доза – ответ») может быть применена линейная модель. Правомерность применения линейной модели для описания указанных выше процессов можно оценить по величине коэффициента корреляции. Полученные параметры достоверны, если значение  $r$  не менее критического значения  $r$  на конкретном уровне значимости (Доспехов, 1985).

### ***2.2.1.2 Всхожесть и урожайность сельскохозяйственных культур***

При закладке полевых экспериментов особое внимание следует уделять качеству посевного материала. Неоднородность посевного материала – существенный фактор, определяющий результаты эксперимента. Для проведения полевых опытов необходимо использовать лучшие районированные сорта семенного материала испытываемых сельскохозяйственных культур. По сортовым качествам семена должны быть не ниже первой репродукции (Методические ука-

зания..., 1975). До посева всхожесть и энергию прорастания семян определяют согласно (ГОСТ 12038-84).

Результаты исследования свидетельствуют (Витковская и др., 2009), что в полевых условиях неоднородность посевного материала оказывает существенное влияние на вариабельность урожайности.

Неоднородность биомассы растений – явление закономерное. Даже в контролируемых условиях (модельные и вегетационные эксперименты) коэффициент вариации массы растений составляет от 5 до 30%, и более (Витковская и др., 2009; Витковская, 2009). Различия роста и развития растений проявляются на самых ранних стадиях развития: процессы метаболизма, гидролиза запасных и синтеза новых веществ, при прорастании семян протекают с различной скоростью. Далее нарастание биомассы будет определяться интенсивностью процессов фотосинтеза и дыхания. Как следствие – варьируется не только масса, но и химический состав растений (Витковская и др., 2010).

При проведении микрополевых опытов определение полевой всхожести должно быть обязательным. Количество растений на делянке выравнивается (при обработке результатов количество растений необходимо привести к единому значению).

Урожайность сельскохозяйственных культур – основной показатель эффективности химических мелиорантов в агроценозе. В зависимости от площади делянки опыта, может устанавливаться сплошным учетом или выборочным (метровками). При выборочном учете необходимо устанавливать количество растений на площади учета для нивелирования фактора неоднородности.

Оценку неоднородности количества растений на учетных площадках целесообразно проводить в полевых опытах с зерновыми, зернобобовыми, многолетними и однолетними травами. Количество растений на единицу площади зависит от равномерности посева семян и может варьировать до 20–40% и более. Чтобы избежать существенных ошибок при учете урожая метровками, определяют количество растений на учетных площадках  $0,25–0,5 \text{ м}^2$  в фазу полных всходов (3–4 площадки на делянке). Устанавливают: а) количество растений на каждой учетной площадке; б) среднее количество растений на учетной площадке; в) стандартное отклонение; г) коэффициент вариации. Результат может быть

использован для корректировки данных, полученных при детальном учете урожайности внутри делянок на площадках 1–2 м<sup>3</sup>, а также для приблизительного расчета урожайности с 1 га (по количеству растений на гектар) (Витковская, 2011). При выращивании зерновых, зернобобовых культур и многолетних трав устанавливается сырая и воздушно-сухая биомасса. Для оценки влияния дозы известкового мелиоранта на урожайность сельскохозяйственных культур хорошо подходит линейная модель. Степень влияния изучаемого фактора на урожайность оценивается по величине коэффициента корреляции (r).

### ***2.2.1.3. Элементный состав сельскохозяйственных культур***

Экспериментальные данные, характеризующие элементный состав сельскохозяйственных культур, позволяют установить зависимость содержания макро- и микроэлементов в растениях от дозы мелиоранта (зависимость доза-ответ). Для комплексной характеристики влияния известковых мелиорантов на распределение макро- и микроэлементов в системе почва растение, содержание химических элементов следует определять как в генеративных, так и в вегетативных органах растений, в том числе – в корнях. Помимо содержания (концентрации) химических элементов, информативным показателем, характеризующим переход элементов из почвы в растения, является коэффициент накопления (КН), представляющий собой отношение концентрации элемента в растениях (Ср) к концентрации в почве (Сп):

$$\text{КН} = \text{Ср}/\text{Сп}.$$

Зависимость  $\text{КН}(f) = \text{Доза}$  может использоваться для характеристики влияния возрастающих доз мелиоранта на распределение химических элементов в системе почва-растение.

### ***2.2.1.4 Динамика нарастания биомассы и изменения элементного состава сельскохозяйственных культур***

Экспериментальные данные, характеризующие динамику нарастание биомассы и изменения элементного состава сельскохозяйственных культур. Методика отбора растительных проб изложена в работах (Дричко, Изосимова, 2011). На каждом варианте полевого опыта выбирают стационарные площадки размером не менее 2×2 м<sup>2</sup>, на которых в течение вегетации в определённые сроки отбираются растения. Количество растений, отбираемых в конкретный срок, зависит от фазы развития и, как правило, может уменьшаться с увеличением

биомассы, но не должно быть меньше 25–30 штук. В фазе всходов количество отбираемых растений составляет до 100 штук. При оценке скорости накопления биомассы количество растений приводят к единой величине (30 шт.).

Основными инструментами для выявления закономерностей, характеризующих процессы в системе «почва – растение», являются зависимости «время – ответ» и «доза – ответ». Построение таких зависимостей позволяет на основании полученных параметров моделей (например, скорости нарастания биомассы) не только количественно и качественно оценить влияние изучаемых факторов на урожай и его качество, но и установить закономерности, общие для любого агрофитоценоза (Витковская, 2015).

Кинетические характеристики могут быть получены в различные временные интервалы: сутки, вегетационный период, год, годы. Для описания процессов, протекающих в агроценозе, наиболее подходят три основные модели: линейная, экспоненциальная и сигмоидная (логистическая). Применение этих моделей позволяет вычислить такие параметры, как скорость, максимальная скорость, период  $T_{1/2}$  (периоды полуудвоения массы, полураспада вещества и т. д.).

Одно из основных условий проведения экспериментов такого рода – не менее 6-ти временных точек (наблюдений). Изучение динамики процесса роста растений позволяет: 1) установить зависимость кинетических характеристик от видовых и сортовых особенностей растений – незаменимый прием при сортоиспытаниях; 2) установить влияние изучаемых факторов на кинетические характеристики (например, влияние различных доз удобрений или изменения температуры) (Витковская и др., 2014). Для построения зависимостей, характеризующих влияние мелиоранта на динамику нарастания биомассы и элементного состава опытной культуры, количество отборов растительных проб должно составлять не менее пяти.

Рост растений описывается кривой Сакса или кривой большого роста – это фундаментальный закон. Отклонение от этого закона можно наблюдать только при существенном изменении внешних условий, влияющих на механизмы клеточного деления и транспорта химических элементов и молекул из почвы в растения (Дричко, Изосимова, 2011).



В серии лабораторных опытов с растениями ячменя сорта Суздалец нами было установлено, что логистическому закону также подчиняются показатели роста и развития растений в период отдельно взятой фазы вегетации (например, прорастание семян, высота надземной части и длина корней проростка, накопление биомассы проростка) (Витковская, Шестакова, 2012).

Для описания динамики накопления биомассы может быть применена логистическая (сигмоидная) модель:

$$M(t) = \frac{M_1 - M_2}{1 + e^{(t-t_0)/dt}} + M_2,$$

где  $M_1$  – начальная биомасса, г, (равна нулю);  $M_2$  – максимальная биомасса, г;  $t_0$  – точка перегиба, в момент которой  $M = 1/2 (M_1 + M_2)$ ;  $dt$  – крутизна кривой (угол наклона) – постоянная величина для данной кривой. Скорость прироста биомассы ( $\text{г} \cdot \text{сут.}^{-1}$ ) достигает максимума в момент, когда  $t = t_0$ . Отношение  $(M_2 - M_1) / 4dt$  характеризует скорость на момент времени  $t_0$  (максимальную), см ( $\text{г} \cdot \text{сут.}^{-1}$ ) ( $V_{\max}$ ).

Данная модель хорошо аппроксимирует также рост растений в высоту и динамику содержания макро- и микроэлементов в растениях (Витковская и др., 2014; Витковская, 2015).

Содержание макроэлементов в растениях закономерно снижается в процессе вегетации (эффект биологического разбавления). Этот процесс может быть аппроксимирован сигмоидной функцией, зеркальной по отношению к уравнению, представленному выше (Витковская, 2015):

$$C(t) = \frac{C_1 - C_2}{1 + e^{(t-t_0)/dt}} + C_2,$$

где  $C_1$  – содержание элемента, % на момент 1-го отбора;  $C_2$  – минимальное содержание элемента, %;  $t_0$  – точка перегиба, в момент которой  $C = 1/2 (C_1 + C_2)$ ;  $dt$  – крутизна кривой (угол наклона) – постоянная величина для данной кривой (данных растений). Скорость уменьшения концентрации ( $\% \cdot \text{сут.}^{-1}$ ) достигала максимума в момент  $t = t_0$ . Отношение  $(C_2 - C_1) / 4dt$  характеризовало скорость на момент времени  $t_0$  (максимальную),  $\% \cdot \text{сут.}^{-1}$ , ( $V_{\max}$ ). Для образцов, взятых на 81-е сут для расчета использовали величины содержания элементов в соломе ячменя.

Использование логистической функции позволяет количественно оценить влияние различных доз мелиоранта на динамику роста растений. Величины  $M_2$  (максимальной биомассы) и  $H_2$  (максимальной высоты) характеризуют влияние изучаемых факторов на урожай, величины  $V_{\max}$  показывают, как эти факторы влияют на скорость формирования биомассы растений (Витковская, 2015).

Для установления скорости нарастания биомассы ( $\text{г}\cdot\text{сут.}^{-1}$ ) может быть применена также линейная модель:

$$M(t) = M_0 + bt,$$

где  $M(t)$  – биомасса растений, г, на момент времени  $t$ ;  $M_0$  – начальная биомасса растений (равна 0);  $b$  – скорость нарастания биомассы,  $\text{г}\cdot\text{сут.}^{-1}$ .

В ряде случаев линейная модель может быть применена для аппроксимации динамики содержания химических элементов в растениях:

$$C(t) = C_0 + bt,$$

где  $C(t)$  – содержание элемента в растениях, %, на момент времени  $t$ ;  $C_0$  – содержание элемента в растениях на момент 1-го отбора;  $b$  – скорость убывания содержания элемента в растениях,  $\%\cdot\text{сут.}^{-1}$ .

Правомерность применения линейной модели для описания указанных выше процессов можно оценить по величине коэффициента корреляции. Полученные параметры достоверны, если значение  $r$  не менее критического значения  $r$  на конкретном уровне значимости (Доспехов, 1985).

#### **2.2.1.5 Вынос химических элементов из почвы растениями**

Вынос химических элементов растениями – важнейший показатель продуктивности угодья, качества урожая и изменения элементного состава пахотных почв. Он зависит от множества факторов, определяющих поступление элементов в растения и нарастание биомассы в течение вегетации. Вынос химических элементов из почвы растениями зависит от: интенсивности их поступления в растения и скорости нарастания биомассы. Известно, что этот показатель варьируется в широких пределах в зависимости от видовых, сортовых особенностей сельскохозяйственных культур и условий выращивания (Витковская, 2015).

Динамика выноса макро- и микроэлементов растениями с урожаем является интегральной характеристикой изменения элементного состава системы почва-растение в процессе функционирования агрофитоценоза, определяющей

скорости изменения концентраций макроэлементов в пахотных почвах, самоочищения почв от примесных элементов (тяжелых металлов), баланс элементов минерального питания в почве (Витковская, 2015).

Скорость нарастания биомассы превышает скорость накопления химических элементов растениями, однако, вследствие непрерывности этих процессов, вынос элементов увеличивается в течение вегетации. Этот процесс может быть аппроксимирован сигмоидной (логистической) функцией (Витковская, 2015):

$$W = \frac{W_1 - W_2}{1 + e^{(t-t_0)/dt}} + W_2,$$

где  $W_1$  – вынос элемента растениями, г·30 шт.<sup>-1</sup> на момент 1-го отбора;  $W_2$  – максимальный вынос элемента, г·30 шт.<sup>-1</sup>;  $t_0$  – точка перегиба, в момент которой  $W = 1/2(W_1 + W_2)$ ;  $dt$  – крутизна кривой (угол наклона) – постоянная величина для данной кривой (данных растений). Скорость увеличения выноса (г·30 шт.<sup>-1</sup>·сут.<sup>-1</sup>) достигает максимального значения в момент  $t = t_0$ . Отношение  $(W_2 - W_1) / 4dt$  характеризует скорость на момент времени  $t_0$  (максимальную), (г·сут.<sup>-1</sup>) ( $V_{\max}$ ).

Сравнение значений  $W_2$  и  $V_{\max}$  по вариантам опыта позволяет количественно оценить влияние возрастающих доз мелиоранта на динамику выноса элементов минерального питания растениями.

Динамику выноса макроэлементов растениями можно аппроксимировать также линейной моделью (Витковская, 2015):

$$W(t) = W_0 + bt,$$

где  $W(t)$  – вынос элемента растениями на момент времени  $t$ , г·30 шт.<sup>-1</sup>;  $W_0$  – вынос элемента растениями на момент 1-го отбора;  $b$  – скорость выноса элемента растениями, г·сут.<sup>-1</sup>.

### ГЛАВА 3. ПРИМЕР ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ИЗВЕСТКОВЫМ МЕЛИОРАНТОМ

#### 3.1 Объекты и методы исследования

Цель исследования: Установить влияние возрастающих доз доломитовой муки на продуктивность сельскохозяйственных культур, кислотно-основные свойства почвы и распределение макро- и микроэлементов в системе почва растение.

Многолетний микрополевой эксперимент был заложен в Меньковском филиале Агрофизического института в полиэтиленовых сосудах без дна ( $S = 1 \text{ м}^2$ , глубина 25 см,  $\approx 300$  кг почвы на сосуд) на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в мае 2012 года (Витковская и др., 2014; Витковская и др., 2016). Перед закладкой опыта из каждой делянки (сосуда) была вынута почва на глубину пахотного слоя (25 см). По периметру делянок размещали полиэтиленовые сосуды без дна, которые наполняли кислой дерново-подзолистой почвой ( $\approx 300$  кг почвы на сосуд):  $\text{pH}_{\text{KCl}}$   $4,64 \pm 0,04$ ,  $\text{Нг}$   $4,11 \pm 0,08$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  –  $2,68 \pm 0,14$  и  $0,36 \pm 0,06 \frac{1}{2}$  ммоль  $\cdot 100 \text{ г}^{-1}$  соответственно. Схема опыта: 1) Контроль; 2) Фон + ДМ 0,2 Нг; 3) Фон + ДМ 0,3 Нг; 4) Фон + ДМ 0,4 Нг; 5) Фон + ДМ 0,5 Нг; 6) Фон + ДМ 0,6 Нг; 7) Фон + ДМ 0,7 Нг; 8) Фон + ДМ 0,8 Нг; 9) Фон + ДМ 0,9 Нг; 10) Фон + ДМ 1,5 Нг.

Размещение делянок систематическое, 2-рядное (рис. 3). Доза доломитовой муки (ДМ) по 1 Нг составила  $5,54 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ . Отбор смешанных почвенных проб проводили два раза в год из каждого сосуда тростевым буром: 1-й отбор до внесения удобрений и мелиоранта – 22 мая 2012 года, далее – через 63; 359; 414; 713; 841; 1078; 1211, 1452, 1575 и 1834 суток после закладки опыта.

В 2012 году опытная культура – викоовсяная смесь: овес сорта «Борус», вика сорта «Нововятская»; 2013 год – рапс сорта «Оредедж-4», 2014 год – овощные бобы сорта «Белорусские»; 2015 год – ячмень сорта «Ленинградский»; 2016 год – викоовсяная смесь: вика – сорт «Льговская-22», овес – сорт «Аргомак». В 2017 году выращивали кормовые бобы, сорт «Русский черный». Суммарная за 2012–2017 гг. доза внесенных минеральных удобрений –  $\text{N400P320K250}$  кг д.в.  $\cdot \text{га}^{-1}$ .

В почве определяли  $pH_{KCl}$  – потенциометрическим методом, гидролитическую кислотность – по Каппену, содержание обменных  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  согласно (ГОСТ 26487-85). Содержание тяжелых металлов в почве и растениях устанавливали атомно-абсорбционным методом. Содержание кислотнорастворимых соединений ТМ в почве определяли в пробах, отобранных из каждого варианта при закладке опыта (до внесения удобрений и мелиоранта, 1-й отбор, май 2012 года) - после химического разложения проб 5М  $HNO_3$ . Содержание обменных Al и Mn определяли в вытяжке 1М KCl; подвижных соединений Mn и Fe - в вытяжках ААБ с pH 4,8 и 0,05М  $H_2SO_4$  соответственно. Содержание подвижных соединений микроэлементов устанавливали в вытяжках ААБ с pH 4,8, Математическую обработку данных проводили в программе ORIGIN 7,5.



Викоовсяная смесь (2012 год)



Ячмень (2015 год)

Рис. 3. Микрополевой эксперимент с доломитовой мукой

### 3.2 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на всхожесть, динамику высоты и урожайность растений ячменя

В качестве примера приведем данные, характеризующие влияние возрастающих доз доломитовой муки на рост и урожайность растений ячменя сорта «Ленинградский» (2015 год) (Шаврина, Витковская, 2016).

Не выявлено существенного влияния возрастающих доз ДМ на всхожесть растений ячменя. Всхожесть, %, варьировалась от  $86 \pm 5$  до  $94 \pm 6$ , коэффициент вариации ( $v$ ) указанного показателя в пределах вариантов изменялся от 2 до 10%.

В процессе вегетации растений ячменя определяли динамику высоты растений – 10 замеров за вегетацию (через 15, 22, 28, 35, 42, 49, 56, 70, 77 и 84 суток после посева), объем выборки – 30 растений (Шаврина, 2017),

Динамика высоты растений хорошо аппроксимировалась логистической моделью, рис. 4:

$$H(t) = \frac{H_1 - H_2}{1 + e^{(t-t_0)/dt}} + H_2,$$

где  $H_1$  – начальная высота, см (равна нулю);  $H_2$  – максимальная высота растений, см;  $t_0$  – точка перегиба, в момент которой  $H=1/2(H_1+H_2)$ ;  $dt$  – крутизна кривой (угол наклона) – постоянная величина для данной кривой. Скорость роста в высоту (см·сут.<sup>-1</sup>) достигала максимума в момент  $t = t_0$ . Отношение  $(H_2-H_1)/4dt$  характеризовало скорость на момент времени  $t_0$  (максимальную), см·сут.<sup>-1</sup> ( $V_{\max}$ ). Параметры модели представлены в табл. 11.

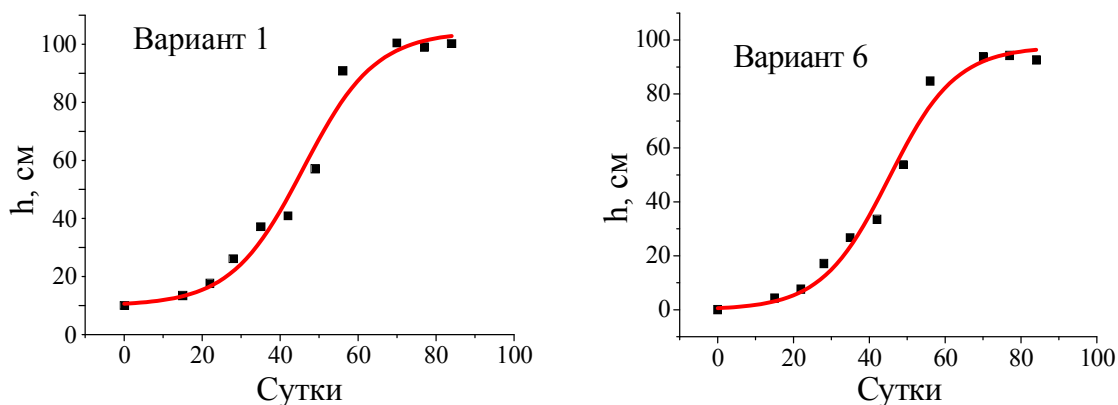


Рис. 4. Динамика изменения высоты растений ячменя в течение вегетации

Таблица 11. Параметры модели, характеризующие динамику высоты растений ячменя (Шаврина, 2017)

Вариант	$r^2$	$H_1$ , см	$H_2$ , см	$t_0$ , сут.	$dt$	$V_{\max}$ , см·сут. <sup>-1</sup>
1. Контроль	0,98	0	94±5	46±2	9±1,5	2,6
2. Фон+ДМ 0,2 Нг	0,98	0	96±5	46±2	8,5±1,4	2,8
3. Фон+ДМ 0,3 Нг	0,98	0	96±4	45±2	8,6±1,4	2,8
4. Фон+ДМ.0,4 Нг	0,98	0	97±4	44±2	9,2±1,3	2,6
5. Фон+ДМ 0,5 Нг	0,98	0	99±4	45±2	8,7±1,3	2,8
6. Фон+ДМ 0,6 Нг	0,99	0	98±4	45±1	8,8±1,2	2,8
7. Фон+ДМ 0,7 Нг	0,99	0	98±4	46±2	8,8±1,2	2,8
8. Фон+ДМ 0,8 Нг	0,98	0	99±5	45±2	8,8±1,4	2,8
9. Фон+ДМ 0,9 Нг	0,98	0	100±5	45±2	8,9±1,4	2,8
10. Фон+ДМ 1,5 Нг	0,99	0	94±4	45±1	8,8±1,2	2,7

**Примечание:** коэффициент  $r^2$  характеризует точность оценочной функции

Установлено, что максимальная скорость изменения высоты растений ячменя ( $V_{\max}$ ), варьировалась в пределах от 2,6–2,8 см·сут.<sup>-1</sup> и практически не зависела от дозы мелиоранта (табл. 11).

В интервале доз ДМ 0–0,9 Нг зависимость урожайности зерна ячменя от дозы мелиоранта характеризовалась коэффициентом корреляции  $r = 0,830$  (критическое значение  $r$  на 5% уровне значимости 0,666). Максимальная урожайность зерна, наблюдаемая в интервале доз 0,5–0,9 Нг, варьировалась в пределах 4,5–4,9 т·га<sup>-1</sup>, что на 29–39% выше, чем в контрольном варианте опыта (табл. 12).

Таблица 12. Влияние возрастающих доз ДМ на урожайность растений ячменя, г·м<sup>-2</sup> (Шаврина, Витковская, 2016)

Вариант	Зерно	Солома	Полова	Зерно : Солома
1. Контроль – Фон	349	397	71	0,88
2. Фон+ДМ 0,2 Нг	437	455	83	0,96
3. Фон+ДМ 0,3 Нг	429	469	82	0,91
4. Фон+ДМ 0,4 Нг	419	426	79	0,98
5. Фон+ДМ 0,5 Нг	470	463	85	1,01
6. Фон+ДМ 0,6 Нг	487	484	86	1,0
7. Фон+ДМ 0,7 Нг	452	444	81	1,01
8. Фон+ДМ 0,8 Нг	474	475	93	1,0
9. Фон+ДМ 0,9 Нг	476	462	86	1,03
10. Фон+ДМ 1,5 Нг	386	351	67	1,1

При внесении ДМ в дозе 1,5 Нг, прибавка урожая зерна не превысила 11%. Влияние на урожайность зерна ячменя ДМ в дозах 0,5–0,6 Нг было практически идентично влиянию доз 0,8–0,9 Нг. Установлена тесная корреляционная связь между дозой ДМ и отношением зерно : солома ( $r=0,925$ ), рис. 5. Вероятно, эффект обусловлен увеличением концентрации магния в почве.

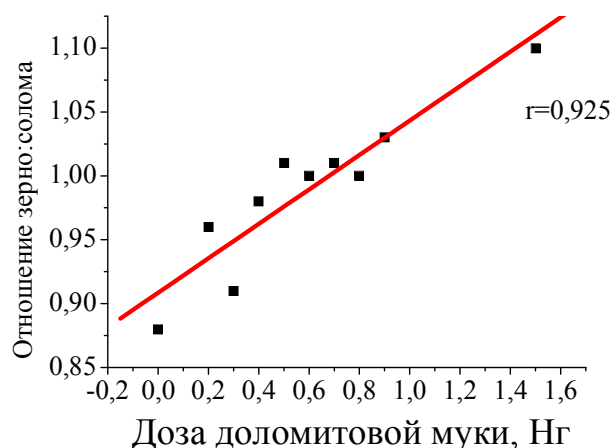


Рис. 5. Зависимость отношения зерно : солома в урожае ячменя от дозы доломитовой муки

### 3.3 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотнo-основнoе свойства почвы

Обменная кислотность почвы опыта до внесения мелиоранта характеризовалась  $pH_{KCl} 4,64 \pm 0,04$ . Динамика  $pH_{KCl}$  почвы представлена в табл. 13. В интервале доз ДМ от 0,2 до 1,5 Нг зависимость  $pH_{KCl}$  почвы от дозы мелиоранта характеризовалась по линейной модели коэффициентами корреляции ( $r$ ) 0,839 и 0,945 на 63-е и 841-е сутки взаимодействия мелиоранта с почвой соответственно (критическое значение  $r$  на 5%-м уровне значимости 0,632). Через 841-и сутки значение  $pH_{KCl}$  изменялось от 4,35 в варианте 1 до 6,0 в варианте 10 (Витковская и др., 2016).

Таблица 13. Динамика  $pH_{KCl}$  почвы (Витковская и др., 2016)

Вариант	Сутки					
	0	63	359	414	713	841
1. Контроль	4,65±0,01	4,55±0,01	4,45±0,02	4,40±0,01	4,51±0,02	4,35±0,01
2. Фон+ДМ 0,2 Нг	4,60±0,00	4,85±0,02	4,75±0,01	4,70±0,02	4,71±0,01	4,62±0,01
3. Фон+ДМ 0,3 Нг	4,62±0,01	4,90±0,01	4,90±0,03	5,00±0,00	5,09±0,01	4,98±0,02
4. Фон+ДМ 0,4 Нг	4,64±0,01	5,00±0,01	5,00±0,00	5,05±0,01	5,12±0,02	4,90±0,02
5. Фон+ДМ 0,5 Нг	4,62±0,01	5,05±0,03	5,25±0,02	5,30±0,03	5,31±0,02	5,21±0,02
6. Фон+ДМ 0,6 Нг	4,71±0,00	5,15±0,02	5,35±0,01	5,25±0,02	5,19±0,01	5,32±0,01
7. Фон+ДМ 0,7 Нг	4,64±0,02	5,05±0,03	5,25±0,01	5,55±0,02	5,56±0,01	5,35±0,01
8. Фон+ДМ 0,8 Нг	4,67±0,01	5,20±0,02	5,50±0,02	5,45±0,01	5,27±0,03	5,40±0,01
9. Фон+ДМ 0,9 Нг	4,59±0,01	5,00±0,02	5,10±0,01	5,80±0,02	5,76±0,01	5,49±0,02
10. Фон+ДМ 1,5Нг	4,62±0,01	5,30±0,01	5,30±0,02	6,00±0,01	5,93±0,02	6,00±0,01

Наблюдения в контрольном варианте опыта позволили установить скорость подкисления почвы, обусловленную применением минеральных удобрений (суммарная за три года доза N210P150K150), выносом оснований растениями и



водами: в период от 0 до 841-их суток после закладки опыта  $pH_{KCl}$  линейно снижался от 4,65 до 4,35 ( $r = -0,763$ ) со скоростью  $2,45 \cdot 10^{-4}$ , рис. 6. За три года почва из категории «среднекислая» перешла в категорию «сильнокислая» (табл. 13),

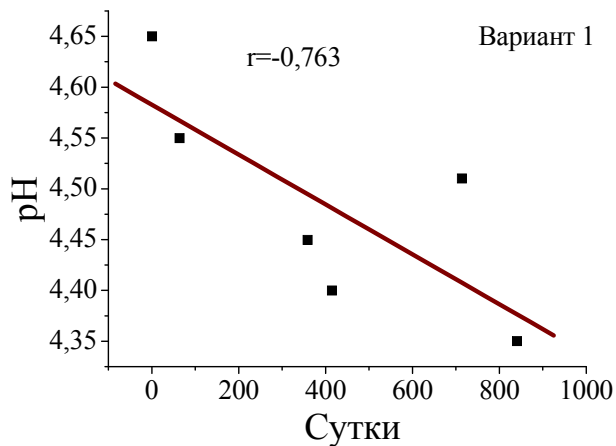


Рис. 6. Динамика  $pH_{KCl}$  почвы в контрольном варианте опыта

Характер зависимости  $pH_{KCl}$  почвы от времени взаимодействия мелиоранта с почвой существенно изменялся в интервале доз ДМ 0,2–1,5 Нг. При внесении ДМ в дозе 0,2 Нг нейтрализующее действие продолжалось не более 800-от суток: на 63-е сутки после внесения мелиоранта pH увеличился от 4,6 до 4,85, а затем линейно снижался ( $r = -0,921$ ), достигнув исходного значения (табл. 13).

Установлено, что при внесении ДМ в дозах 0,3 и 0,4 Нг нейтрализующее действие мелиоранта продолжалось не менее 900-от суток:  $pH_{KCl}$  почвы в период от 0 до 713 суток линейно возрастал от 4,62 до 5,09 ( $r = 0,853$ ) и от 4,64 до 5,12 ( $r = 0,767$ ) соответственно, затем несколько снижался (табл. 13).

При внесении ДМ в дозах 0,5 и 0,6 Нг максимальные значения  $pH_{KCl}$  почвы были зафиксированы на 713-е (pH 5,31) и 359-е (pH 5,35) сутки соответственно, на протяжении всего срока наблюдения не выявлено тенденции подкисления почвы. По данным (Шильников и др., 2008), влияние ДМ в дозе 0,5 Нг на pH почвы на неудобренном фоне продолжалось в течение шести лет, а на фоне минеральных удобрений и навоза – семи лет.

Нейтрализующее действие ДМ в дозах 0,7–0,8 Нг было сопоставимо с нейтрализующим действием доз 0,5–0,6 Нг: значение  $pH_{KCl}$  почвы не превысило

5,5, почва также характеризовалась как слабокислая. При увеличении дозы ДМ до 0,9 Нг почва перешла в категорию близкой к нейтральной ( $pH_{KCl}$  5,6–6,0), максимальное значение  $pH_{KCl}$  составило 5,8 через 414–713 суток взаимодействия мелиоранта с почвой. Далее (813-е сутки) наблюдали снижение реакции до слабокислой –  $pH$  5,49. При применении ДМ в дозе 1,5 Нг, значение  $pH_{KCl}$  достигло 6-ти через 414 суток взаимодействия мелиоранта с почвой и оставалось на этом уровне в течение всего срока наблюдения.

До закладки опыта средняя по вариантам гидролитическая кислотность почвы составляла  $4,11 \pm 0,08$  ммоль·100 г<sup>-1</sup>. На 841-е сутки в контрольном варианте опыта Нг возросла с 4,14 до 4,61 ммоль·100 г<sup>-1</sup>. В интервале доз ДМ 0,2–1,5 Нг на 841-е сутки взаимодействия мелиоранта с почвой наблюдали тесную корреляционную связь между дозой мелиоранта и значением Нг ( $r = -0,935$ ), рис. 7. При внесении ДМ в дозах 0,3, 0,5 и 1,5 Нг, гидролитическая кислотность снизилась в 1,3; 1,4 и 2,4 раза соответственно, то есть существенное влияние на этот показатель наблюдали через два года после внесения даже малых доз мелиоранта (Витковская и др., 2016).

На момент закладки опыта содержание обменного  $Ca^{2+}$  в почве составляло  $2,7 \pm 0,1$  ½ ммоль·100 г<sup>-1</sup>, обменного  $Mg^{2+}$  –  $0,36 \pm 0,06$  ½ ммоль·100 г<sup>-1</sup> (рис. 8, табл. 14), что согласно градации почв по содержанию элементов питания (Методические указания..., 2003), соответствует низкому и очень низкому содержанию элементов, соответственно.

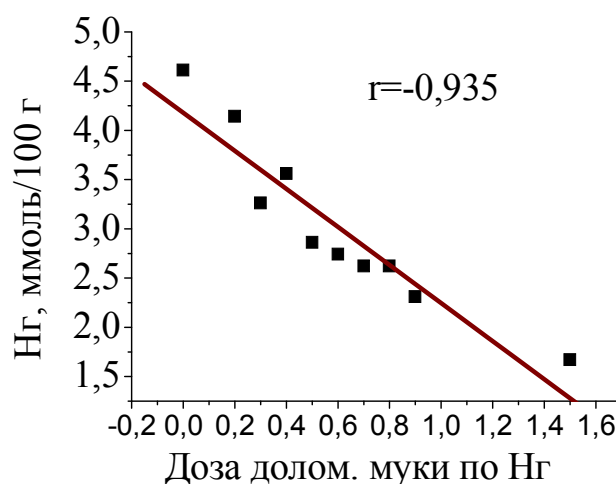


Рис. 7. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на гидролитическую кислотность почвы (841-е сутки)

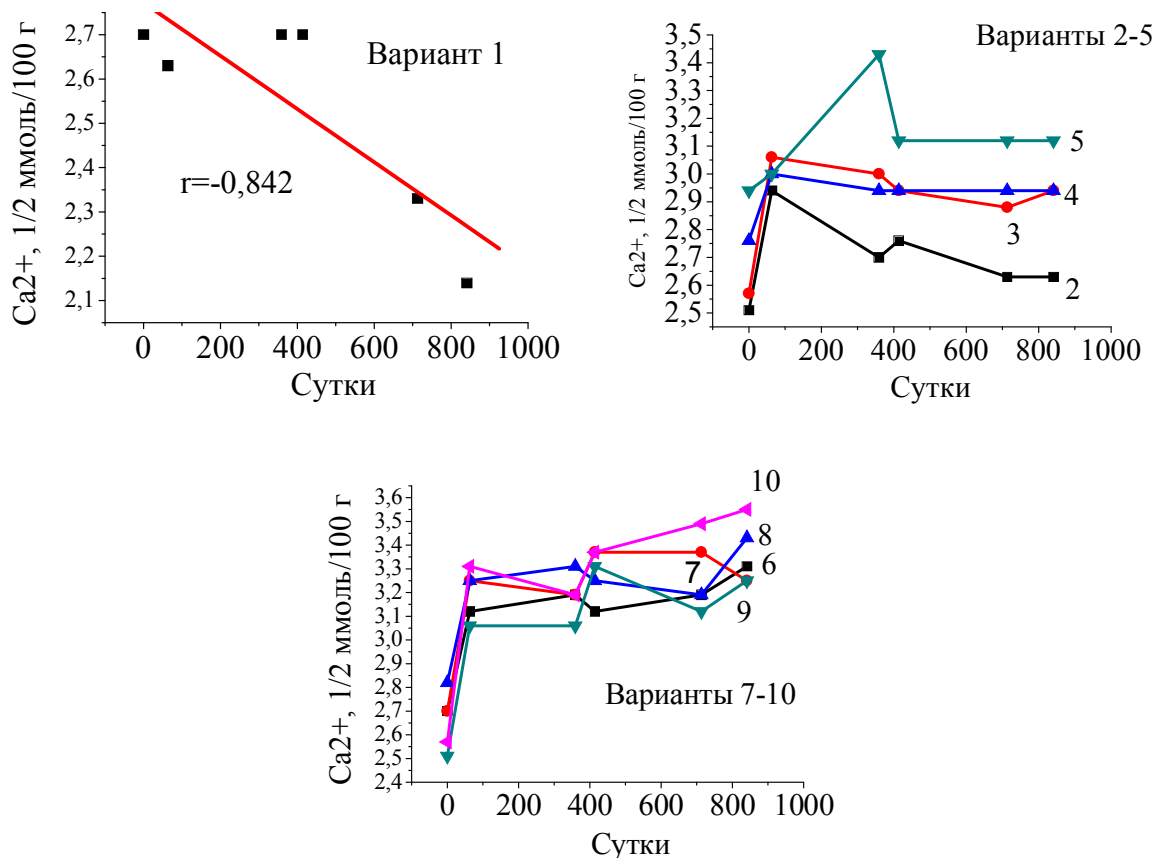


Рис. 8. Динамика содержания обменного Ca<sup>2+</sup> в почве (Витковская и др., 2016)

Таблица 14. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на динамику обменного Mg<sup>2+</sup>, ½ ммоль·100 г<sup>-1</sup> почвы (Витковская и др., 2016)

Вариант	Сутки					
	0	63	359	414	713	841
1. Контроль	0,35±0,02	0,35±0,02	0,14±0,01	0,14±0,01	0,35±0,02	0,32±0,01
2. Фон+ДМ 0,2 Нг	0,35±0,02	0,56±0,03	0,46±0,02	0,46±0,01	0,60±0,02	0,42±0,02
3. Фон+ДМ 0,3 Нг	0,39±0,01	0,46±0,03	0,49±0,02	0,56±0,03	0,67±0,04	0,67±0,02
4. Фон+ДМ 0,4 Нг	0,42±0,07	0,53±0,04	0,60±0,03	0,53±0,02	0,67±0,03	0,63±0,03
5. Фон+ДМ 0,5 Нг	0,39±0,01	0,56±0,02	0,70±0,03	0,63±0,02	0,77±0,04	0,70±0,03
6. Фон+ДМ 0,6 Нг	0,28±0,04	0,77±0,03	0,81±0,02	0,63±0,03	0,77±0,02	0,84±0,04
7. Фон+ДМ 0,7 Нг	0,28±0,04	0,60±0,03	0,60±0,03	0,70±0,02	0,88±0,03	0,88±0,02
8. Фон+ДМ 0,8 Нг	0,35±0,03	0,81±0,03	0,81±0,02	0,70±0,02	0,63±0,02	0,84±0,02
9. Фон+ДМ 0,9 Нг	0,49±0,09	0,67±0,02	0,74±0,04	0,88±0,01	0,88±0,02	0,88±0,02
10. Фон+ДМ 1,5Нг	0,35±0,03	1,09±0,04	0,95±0,02	0,95±0,04	1,02±0,03	1,02±0,02

Максимальное увеличение содержания обменных  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в почве на 63-е сутки (доза 1,5 Нг) по отношению к исходному содержанию составило 29 и 211% соответственно (рис. 8, табл. 14). В контрольном варианте опыта содержание обменного  $\text{Ca}^{2+}$  в период от 0 до 841-х суток после закладки опыта линейно снижалось ( $r=-0,842$ ), рис. 8, содержание обменного  $\text{Mg}^{2+}$  не зависело от времени в течение всего срока наблюдения (табл. 14).

Содержание обменных  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в почве существенно зависело от дозы мелиоранта (рис. 8, табл. 15). Динамика обменного  $\text{Ca}^{2+}$  при внесении мелиоранта в интервале доз 0,2–0,5 Нг представлена кривыми с максимумом. В варианте 2 в период 63–841-е сутки взаимодействия мелиоранта с почвой содержание обменного  $\text{Ca}^{2+}$  линейно снижалось ( $r = -0,921$ ). Внесение ДМ в дозах 0,6–1,5 Нг обеспечило увеличение содержания элемента в почве не менее чем на три года (рис. 8). Зависимость содержания обменных  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в почве от дозы мелиоранта хорошо аппроксимирует линейная модель (табл. 15).

В почве опыта до внесения ДМ содержание  $\text{Ca}^{2+}$  превышало содержание  $\text{Mg}^{2+}$  в  $7,5 \pm 1,4$  раз (табл. 16). На 63-е сутки взаимодействия ДМ с почвой линейная зависимость между дозой мелиоранта (в интервале от 0 до 1,5 Нг) и отношением содержания обменных Ca:Mg характеризовалась коэффициентом корреляции  $r=-0,859$  (критическое значение  $r$  на 5% уровне значимости 0,632). В указанный период при внесении ДМ в дозах 0,2 и 1,5 Нг отношение Ca : Mg в почве снизилось в 1,4 и 2,4 раза соответственно по отношению к исходному, а через 841-и сутки различие составляло 1,1 и 2,0 раза (табл. 16).

Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимости: pH-Ca, pH-Mg и Ca-Mg в почве, представлены в таблице 17.

**Таблица 15. Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость между содержанием обменных  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в почве и дозой мелиоранта (Витковская и др., 2016)**

Сутки	$r^*$	
	$\text{Ca}^{2+}=f(\text{доза})$	$\text{Mg}^{2+}=f(\text{доза})$
63	0,814	0,924
359	0,593	0,866
414	0,876	0,916
713	0,867	0,858
841	0,854	0,904

\* критическое значение  $r$  на 5% уровне значимости 0,632

Таблица 16. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на динамику отношения содержания обменных  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в почве (Ca : Mg) (Витковская и др., 2016)

Вариант	Сутки					
	0	63	359	414	713	841
1. Контроль	7,7	7,5	19,0	19,0	6,6	6,7
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	7,2	5,2	5,9	6,0	4,4	6,3
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	6,6	6,6	6,1	5,25	4,3	4,4
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	6,6	5,7	4,9	5,5	4,4	4,7
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	7,5	5,4	4,9	5,0	4,0	4,4
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	9,6	4,0	3,9	5,0	4,1	3,9
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	9,6	5,4	5,3	4,8	3,8	3,7
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	8,0	4,0	4,1	4,6	5,1	4,1
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	5,1	4,6	4,1	3,8	3,5	3,7
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	7,3	3,0	3,4	3,5	3,4	3,5

Таблица 17. Коэффициенты корреляции, характеризующие влияние возрастающих доз ДМ на зависимости рН–Ca, рН–Mg и Ca–Mg в почве (Витковская и др., 2016)

Вариант	<i>r</i>		
	рН–Ca	рН–Mg	Ca–Mg
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	0,903	0,724	0,572
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,692	0,858	0,356
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,853	0,743	0,649
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,621	0,934	0,640
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,956	0,925	0,969
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,925	0,888	0,868
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,919	0,869	0,963
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,856	0,960	0,928
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	0,926	0,758	0,934

Критическое значение *r* при 5% уровне значимости 0,811.

### 3.4 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание подвижных соединений алюминия, марганца и железа в почве

До закладки опыта содержание обменных (1М KCl) и кислоторастворимых (5М HNO<sub>3</sub>) соединений Al в почве составляло 4,6±1,05 и 387±12 мг·кг<sup>-1</sup> соответственно. Доля содержания обменного Al в почве по отношению к содержанию кислоторастворимых соединений не превысила 1,2%.

В контрольном варианте содержание обменного Al в период 0–841 сут. возросло в 5,6 раза. При внесении ДМ в дозе 0,2 Нг снижение содержания обменного Al в почве наблюдали не более 800 суток. Внесение ДМ в интервале

доз 0,3–1,5 Нг обеспечило существенное снижение содержания обменного Al в почве на протяжении всего срока наблюдения. Наиболее интенсивное снижение содержания обменного Al в почве в интервале доз ДМ 0,2–1,5 Нг наблюдали в течение первых 63-х суток взаимодействия мелиоранта с почвой – в 2,5; 3; 4; 3; 5,9; 3; 3; 4,8 и 3,4 раза, соответственно (Витковская и др., 2016; Витковская, 2016), рис. 9.

До закладки опыта содержание кислоторастворимых соединений Mn в почве составляло  $424 \pm 28$  мг·кг<sup>-1</sup>. Содержания обменного (КСл) и подвижного (ААБ) Mn в почве изменялись в пределах  $37 \pm 0,94$  (8% от содержания кислоторастворимого) и  $53 \pm 1,4$  (12% от содержания кислоторастворимого) мг·кг<sup>-1</sup> соответственно.

На протяжении всего срока наблюдения содержание обменного Mn в почве линейно снижалось (рис. 10). Коэффициенты корреляции ( $r$ ), характеризующие зависимость содержания обменного Mn в почве от дозы ДМ, составили: -0,904, -0,748, -0,895, -0,916 и -0,934 на 63-е, 359-е, 414-е, 713-е и 841-е сутки соответственно (Витковская, 2016; Витковская, Яковлев, 2017).

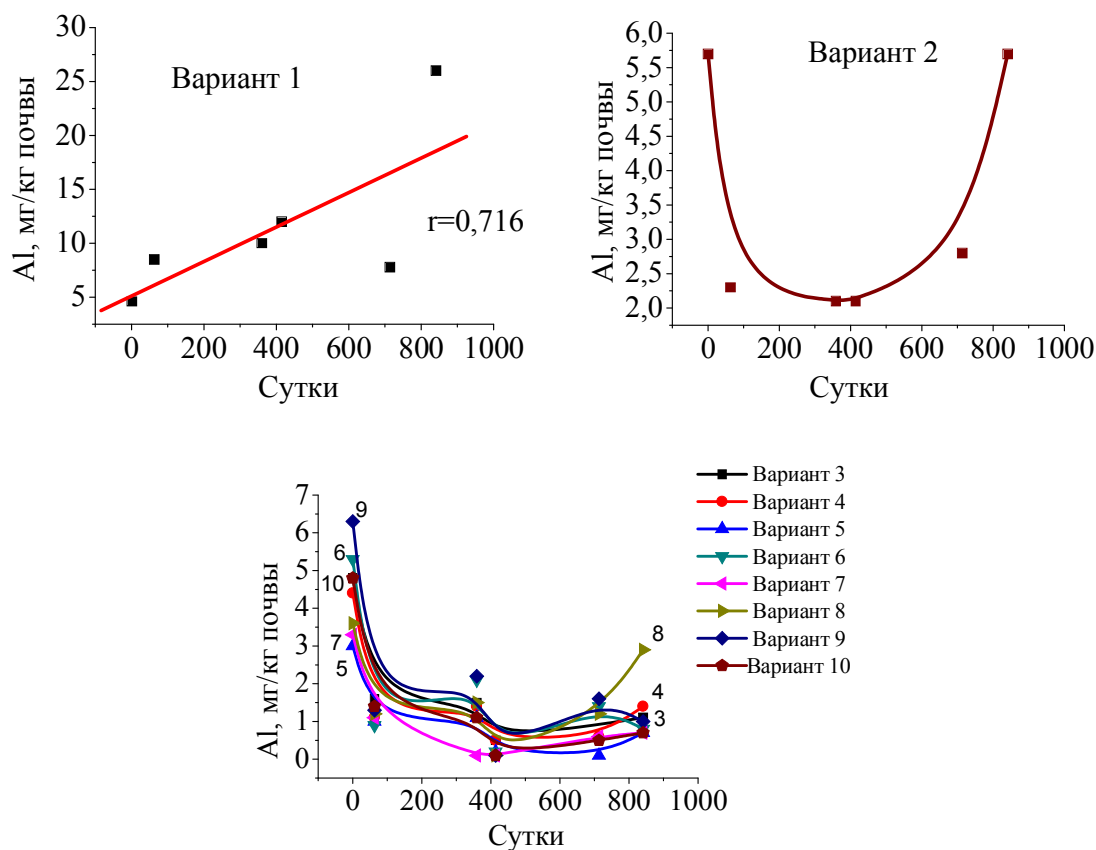


Рис. 9. Динамика содержания обменного алюминия в почве

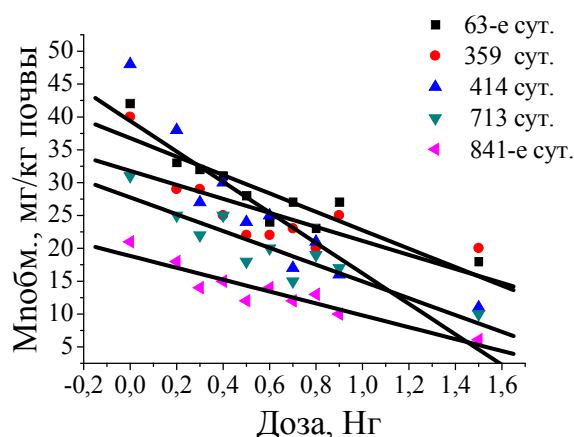


Рис. 10. Влияние возрастающих доз ДМ на содержание обменного Mn в почве (Витковская, Яковлев, 2017)

Динамика содержания подвижного Fe в почве представлена в таблице 18.

Таблица 18. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на динамику подвижного Fe в почве,  $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$  ( $0,05\text{M H}_2\text{SO}_4$ ) (Витковская, Яковлев, 2017)

Вариант	Сутки					
	0	63	359	414	713	841
1. Контроль	165±2	222±2	145±1	176±3	217±2	230±1
2. Фон+ДМ 0,2 Нг	182±1	215±2	135±1	170±2	220±3	233±2
3. Фон+ДМ 0,3 Нг	170±2	207±1	150±2	171±1	207±3	212±2
4. Фон+ДМ 0,4 Нг	173±2	218±2	147±2	178±1	214±2	214±3
5. Фон+ ДМ 0,5 Нг	186±1	215±2	145±1	171±2	213±2	212±2
6. Фон+ ДМ 0,6 Нг	188±3	232±3	139±2	171±2	216±2	215±3
7. Фон+ ДМ 0,7 Нг	185±3	213±2	147±3	167±2	229±3	217±3
8. Фон+ ДМ 0,8 Нг	185±2	212±2	164±2	188±3	235±3	211±2
9. Фон+ ДМ 0,9 Нг	212±4	215±1	137±1	176±1	253±2	214±2
10. Фон+ДМ 1,5 Нг	213±4	210±2	135±1	172±2	241±2	198±3

До закладки опыта содержания кислоторастворимых и подвижных соединений Fe в почве в период от 63–414 суток не зависело от дозы ДМ, на 713-е сутки линейно возрастало ( $r = 0,734$ ). Линейное снижение содержания подвижных соединений Fe в почве в интервале доз ДМ от 0 до 1,5 Нг наблюдали только на 841-е сутки опыта ( $r = -0,825$ ). Однако, следует отметить, что максимальное снижение нахождения Fe в подвижной форме не превышало 14% (вар. 10, табл. 18). На основании полученных результатов можно сделать вывод, что содержание подвижных соединений Fe практически не зависело от дозы ДМ (Витковская, Яковлев, 2017).

Динамика содержания подвижного Fe в почве представлена на рис. 11. Установлено, что содержание подвижного Fe не зависело от реакции почвы (Витковская, Яковлев, 2017).

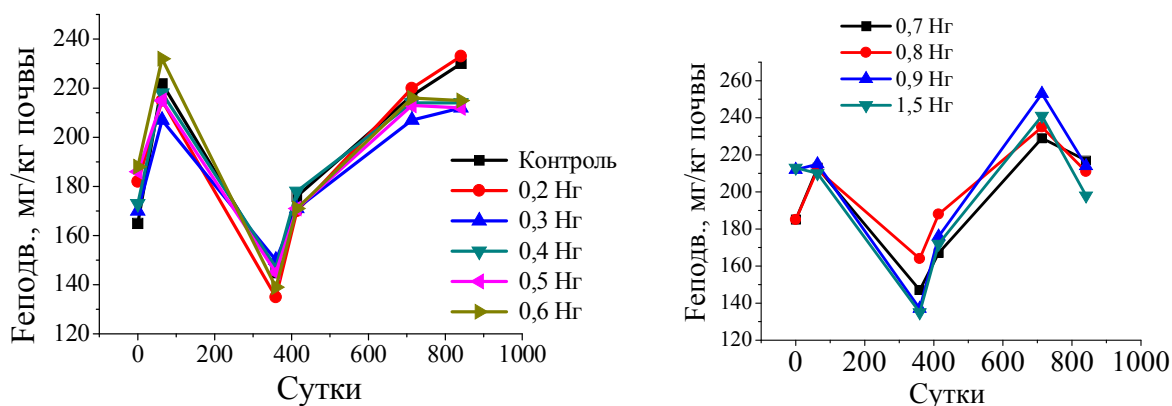


Рис. 11. Динамика содержания подвижного железа в почве (Витковская, Яковлев, 2017)

### 3.5 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание кадмия в растениях ячменя

Результаты исследования (2015 год) подтвердили информацию, представленную в работе (Алексеев, 2008), что изменение кислотно-основных свойств почвы при известковании может приводить к возрастанию концентраций кадмия в зерне.

В интервале доз ДМ 0 1,15 Нг содержание Cd в зерне ячменя сорта «Ленинградский» линейно возрастало ( $r = 0,662$  при критическом значении  $r$  на 5% уровне значимости 0,632), рис. 12. При внесении ДМ в дозах 0,9 и 1,5 Нг содержание Cd в зерне превысило содержание в контроле в 4,8 и 3,8 раза соответственно. Доза 0,2 Нг привела к возрастанию кадмия в зерне в 2,3 раза (табл. 19).

Содержание Cd в полове существенно превысило содержание в зерне (кроме вариантов 2 и 10), но не зависело от дозы мелиоранта. Выявлено, что внесение ДМ привело к существенному снижению различий между содержанием элемента в зерне и полове: отношение  $C_3/C_1$  (табл. 19) в вариантах 2–10 изменялось в пределах 0,4–3,7, а в контрольном варианте достигло 5,3. Возможно, что возрастание концентрации кадмия в зерне при известковании кислых почв связано с изменением механизма распределения элемента между вегетативными и генеративными органами вследствие усиления конкурентных взаимодействий между элементами-аналогами (Ca-Cd и Mg-Cd).



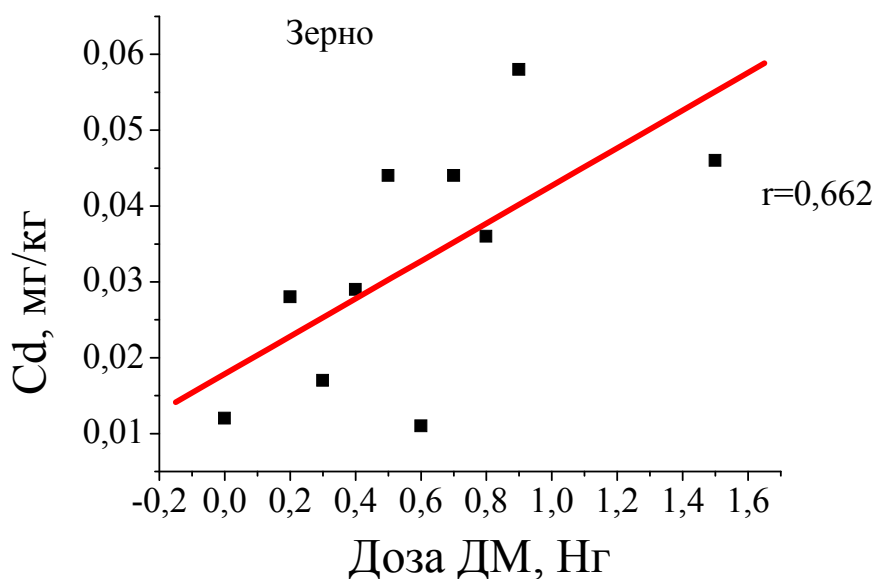


Рис. 12. Зависимость содержания кадмия в зерне ячменя от дозы доломитовой муки

Таблица 19. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание кадмия в растениях ячменя,  $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$  а.с.в.

Вариант	Зерно (C1)	Солома (C2)	C2/C1	Полова (C3)	C3/C1
1. Контроль	0,012	<0,01	0,8	0,064	5,3
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	0,028	0,021	0,8	0,011	0,4
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,017	0,084	4,9	0,031	1,8
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,029	0,018	0,6	0,082	2,8
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,044	0,016	0,4	0,070	1,6
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,011	0,048	4,4	0,041	3,7
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,044	0,018	0,4	0,076	1,7
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,036	0,01	0,3	0,076	2,1
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,058	<0,01	0,2	0,074	1,3
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	0,046	<0,010	0,2	0,029	0,6

Представленные в Главе 3 результаты исследования позволяют сделать следующие выводы (Витковская и др., 2016; Шаврина, 2017; Витковская, Яковлев, 2017):

1) Динамика высоты растений ячменя хорошо аппроксимировалась логистической моделью. Максимальная скорость изменения высоты растений ( $V_{\text{max}}$ ), варьировалась в пределах от 2,6–2,8  $\text{см}\cdot\text{сут.}^{-1}$  и практически не зависела от дозы мелиоранта.

2) Максимальная урожайность зерна ячменя, наблюдаемая в интервале доз доломитовой муки 0,5–0,9, варьировалась в пределах 4,52–4,87 т·га<sup>-1</sup>, что на 29–39% выше, чем в контрольном варианте опыта. Установлена тесная корреляционная связь между дозой мелиоранта и отношением зерно:солома ( $r = 0,925$ , при критическом значении  $r$  на 5% уровне значимости 0,632).

3) В контрольном варианте опыта в период от 0 до 841-их суток после закладки опыта рН<sub>KCl</sub> почвы линейно снижался с 4,65 до 4,35 ( $r = -0,763$ ).

4) Характер зависимости рН<sub>KCl</sub> почвы от времени взаимодействия мелиоранта с почвой существенно изменялся в интервале доз ДМ 0,2–1,5 Нг.

5) В интервале доз ДМ 0,2–1,5 Нг на 841-е сутки взаимодействия мелиоранта с почвой наблюдали тесную корреляционную связь между дозой мелиоранта и значением Нг ( $r = -0,935$ )

6) Зависимость содержания обменных Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> в почве от дозы мелиоранта хорошо аппроксимирует линейная модель.

7) Динамика содержания обменных Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> в почве существенно зависела от дозы мелиоранта. Внесение ДМ в дозах 0,6–1,5 Нг обеспечило увеличение содержания обменного Ca<sup>2+</sup> в почве не менее чем на три года.

8) Содержание обменного Mg<sup>2+</sup> в почве, при внесении ДМ в дозах 0,3–0,9 Нг, линейно возрастало в течение 841 суток. При внесении ДМ в дозе 1,5 Нг содержание обменного Mg<sup>2+</sup> достигло максимального значения на 63-е сутки после внесения мелиоранта с почвой, и оставалось практически неизменным на протяжении всего срока наблюдения.

9) В контрольном варианте содержание обменного Al в период 0–841 сут. возросло в 5,6 раза. При внесении ДМ в дозе 0,2 Нг снижение содержания обменного Al в почве наблюдали не более 800 суток. Внесение ДМ в интервале доз 0,3–1,5 Нг обеспечило существенное снижение содержания обменного Al в почве на протяжении всего срока наблюдения.

10) В интервале доз ДМ 0–1,5 Нг содержание обменного (1М KCl) Mn в почве линейно снижалось, коэффициенты корреляции ( $r$ ) составили, соответственно, –0,904; –0,748; –0,859; –0,916 и –0,934 на 63-е, 369-е, 414-е, 713-е и 841-е сутки взаимодействия мелиоранта с почвой. При внесении ДМ в дозе 1,5 Нг содержание обменного Mn в почве снизилось на 57%.

11) Динамика содержания обменного и подвижного Mn в почве в течение 814-ти суток взаимодействия ДМ с почвой зависела от дозы мелиоранта, в интервале доз ДМ 0,3–1,5 Нг хорошо аппроксимировалась линейной моделью. Скорости снижения нахождения Mn в обменной и подвижной формах в указанном диапазоне доз изменялись в пределах  $0,020\text{--}0,027\text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{сут.}^{-1}$  и  $0,018\text{--}0,027\text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{сут.}^{-1}$ , соответственно.

12) Содержание подвижных соединений Fe в почве практически не зависело от дозы ДМ.

13) Динамика подвижных соединений Fe в почве зависела от дозы мелиоранта. В интервале доз ДМ 0–0,6 Нг в период 360–840 суток наблюдали линейное увеличение содержания подвижных соединений элемента. В интервале доз 0,7–1,5 Нг динамика содержания подвижного Fe представлена кривой с двумя максимумами.

14) Содержание обменного Mn (1 М KCl) в почве было более тесно связано с реакцией почвы, чем содержание подвижного Mn (ААБ 4,8). Значимое влияние реакции почвы на содержание обменного Mn проявилось в диапазоне доз 0,5–1,5 Нг. Содержание подвижного Fe не зависело от реакции почвы.

15) В интервале доз доломитовой муки 0–1,15 Нг содержание Cd в зерне ячменя сорта «Ленинградский» линейно возрастало ( $r = 0,662$  при критическом значении  $r$  на 5% уровне значимости 0,632). При внесении мелиоранта в дозах 0,9 и 1,5 Нг содержание Cd в зерне превысило содержание в контроле в 4,8 и 3,8 раза соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мелиоративным является любой прием, направленный на улучшение условий роста и развития растений в агроценозе. Применение химических мелиорантов в сельскохозяйственном производстве сопровождается изменением основных характеристик агроэкосистемы: параметров плодородия пахотных почв и продуктивности сельскохозяйственных культур. Эффективность и экологическая безопасность – основные критерии, определяющие агрономическую и экономическую целесообразность применения того или иного мелиоранта без ущерба для окружающей природной среды.

Урожайность сельскохозяйственных культур – основной показатель эффективности мелиорантов в агроценозе. В сельскохозяйственном производстве для оценки эффективности применения мелиорантов принято использовать показатели агрономической, экономической, энергетической и экологической эффективности. Агрономическая эффективность удобрений оценивается по величине прибавки урожая и окупаемостью NPK или 1 т органических удобрений. Определение экономической эффективности удобрений показывает, насколько рентабельно их применение. Экологическая эффективность проявляется как результат восстановления и сохранения плодородия почв, отсутствие негативного воздействия на сопредельные среды.

Экологическая безопасность химических мелиорантов определяется, прежде всего, безопасностью их химического состава и может быть оценена на основе результатов анализа риска их влияния на структурные компоненты агроэкосистемы и здоровье человека. Если содержание примесных химических элементов в мелиоранте превышает гигиенические нормативы, установленные для почв, необходимо жестко регламентировать дозы и периодичность его внесения.

Эффективность приемов известкования кислых почв определяется степенью достижения результатов при решении следующих задач:

- 1) Оптимизация кислотно-основных свойств агроземов.
- 2) Повышение урожайности сельскохозяйственных культур.
- 3) Повышение качества продукции растениеводства.

Эффект от известкования кислых почв в агроценозе варьируется в широком диапазоне в зависимости от свойств почвы, дозы и физико-химических свойств мелиоранта, генетически обусловленных особенностей растений. Дать качественную и количественную оценку эффективности различных доз известкового мелиоранта и сопряженных с ними кислотно-основных свойств известкованных почв, влияющих на продуктивность и элементный состав сельскохозяйственных культур, позволяют результаты исследований, полученные в многолетних экспериментах с широким диапазоном доз мелиоранта. Изучение закономерностей распределения макро- и микроэлементов в системе почва-растение в зависимости от дозы мелиоранта и времени взаимодействия его с почвой необходимо для возможности прогнозирования элементного состава растений при известковании кислых почв, снижению риска получения несбалансированной по микроэлементному составу продукции растениеводства.

На загрязненных тяжелыми металлами или техногенными радионуклидами почвах известкование может рассматриваться как эффективный прием снижения их биодоступности. Критерии оценки эффективности известкования на загрязненных почвах:

1) Зависимость содержания подвижных соединений тяжелых металлов в почве от дозы мелиоранта (доза – ответ).

2) Зависимость содержания подвижных соединений тяжелых металлов в почве от времени взаимодействия мелиоранта с почвой (время – ответ).

3) Зависимость содержания тяжелых металлов (радионуклидов) в продукции растениеводства от дозы мелиоранта.

4) Зависимость коэффициентов накопления элементов растениями от дозы мелиоранта и времени взаимодействия их с почвой.

Многолетние полевые эксперименты являются основным источником информации, позволяющей количественно оценить эффективность и экологическую безопасность химических мелиорантов. Важнейшими задачами, которые должны решаться в процессе проведения полевых экспериментов с известковыми мелиорантами, особенно при испытании новых видов мелиорантов, являются:

1) Установление доз мелиоранта, которые можно рассматривать как эффективные по отношению к физико-химическим свойствам почвы и различным видам сельскохозяйственных культур.

2) Установление доз мелиоранта, которые можно рассматривать как экологически безопасные по отношению к показателям качества окружающей среды и сельскохозяйственной продукции.

Основными инструментами, которые могут быть применены для оценки экологической безопасности и эффективности химических мелиорантов, являются зависимости «время – ответ» и «доза – ответ». Построение таких зависимостей позволяет на основании полученных параметров моделей не только количественно и качественно оценить влияние изучаемых факторов на параметры плодородия почвы, урожай и его качество, но и установить закономерности, общие для любого агрофитоценоза. Для описания процессов, протекающих в агроценозе, наиболее подходят три основные модели: линейная, экспоненциальная и сигмоидная (логистическая).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акулов П. Г., Богомазов Н. П., Нетребенко Н. Н. Тяжелые металлы на выщелоченных черноземах Белгородской области // *Химия в сельском хозяйстве*. 1995. № 5. С. 27–28.
- Алексеев Ю. В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агрометеиздат, 1987. 142 с.
- Алексеев Ю. В. Тяжелые металлы в агроландшафте. СПб.: ПИЯФ РАН, 2008. 216 с.
- Алметов Н. С. Влияние минеральных и органических удобрений на изменение содержания тяжелых металлов в почвах разного гранулометрического состава в условиях Республики Марий Эл // *Агрохимия*. 1996. № 10. С. 122–124.
- Аристархов А. Н., Харитоновна А. Ф. Состояние и методология прогноза загрязнения почв тяжелыми металлами // *Плодородие*. 2002. № 3. С. 22–24.
- Белоусцева Е. В. Мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий Нечерноземной зоны Российской Федерации // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 1. С. 57–64.
- Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н. Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // *Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2008. № 5. С. 9–14.
- Бондур В. Г., Гороховский К. Ю., Игнатъев В. Ю., Мурынин А. Б., Гапонова Е. В. Метод прогнозирования урожайности по космическим наблюдениям за динамикой развития вегетации // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2013. № 6, С. 61–68.
- Бушуев Н. Н. Влияние применения минеральных удобрений, навоза и извести на содержание тяжелых металлов в почвах длительных полевых опытов / *Материалы международной научно-практической конференции «Роль природообустройства в обеспечении устойчивого функционирования и развития экосистем»*. М.: МГУП, 2006. [http://msuee.ru/science/1/sb-06.files/1\\_44\\_sb\\_06.html](http://msuee.ru/science/1/sb-06.files/1_44_sb_06.html).
- Быков А. А., Мурзин Н. В. Проблемы анализа безопасности человека, общества и природы. - СПб: Наука, 1997. 243 с.
- Быков А. А. Оценка ущерба – один из ключевых этапов анализа риска // *Проблемы анализа риска*. 2005. Т. 2. № 1. С. 4–5.
- Быков А. А., Порфирьев Б.Н. Об анализе риска, концепциях и классификациях рисков // *Проблемы анализа риска*. 2006. Т. 3. № 4. С. 319–337.
- Ваганов П.А. Как рассчитать риск здоровью из-за загрязнения окружающей среды: Задачи с решениями. СПб.: Изд-во С-Петербур. ун-та, 2008. 129 с.
- Витковская С. Е., Дричко В. Ф. Динамика кислотности почвы и содержания подвижных форм кальция, калия и фосфора при использовании компоста их твердых бытовых отходов // *Почвоведение*. № 5. 2004. С. 596–603.
- Витковская С. Е. Изменение содержания подвижных форм химически элементов в процессе трансформации органического вещества компоста из твердых бытовых отходов // *Агрохимия*. 2005. № 4. С. 27–31.
- Витковская С. Е. Агроэкологические основы использования биотермически переработанных твердых бытовых отходов для повышения плодородия кислых почв: дисс. ....доктора биол. наук. СПб, 2006. 249 с.
- Витковская С. Е. Оценка пространственной неоднородности агрохимических показателей почвы и массы растений в полевом опыте // *Плодородие*. 2009. № 5. С. 8–9.
- Витковская С. Е., Изосимова А. А., Шидловская Т. П. Вариабельность параметров урожая в полевом опыте / *Сборник научных трудов «Гумус и почвообразование»*. СПб. – Пушкин: СПбГАУ, 2009. С. 135–139.
- Витковская С. Е., Изосимова А. А., Шидловская Т. П. Пространственная изменчивость биомассы и химического состава растений пшеницы в пределах делянки полевого опыта // *Агрохимия*. 2010. № 12. С. 29–36.
- Витковская С. Е. Методы оценки неоднородности почвенного покрова при планировании и проведении полевых опытов. СПб.: АФИ, 2011. 52 с.

- Витковская С. Е., Хофман О. В. Риск здоровью как составляющая агроэкологического риска / Материалы Всероссийской научной конференции «Методы оценки сельскохозяйственных рисков и технологии смягчения последствий изменения климата в земледелии», Санкт-Петербург, 13–14 октября 2011 г. СПб., 2011. С. 141–144.
- Витковская С. Е. Твердые бытовые отходы: антропогенное звено биологического круговорота. СПб.: АФИ, 2012. 130 с.
- Витковская С. Е., Дричко В.Ф. Управление агроэкологическим риском: проблемы и решения // Докл. научно-практ. конф., посвящ. 40-летию основания ВНИИСХРАЭ РАСХН «Проблемы радиологии и агроэкологии». Обнинск, 5–6 октября 2011. Обнинск, 2012. С. 353–357.
- Витковская С. Е., Хофман О. В. Оценка экологического риска в системе агроэкологического мониторинга / Материалы II Междунар. научно-практ. конф. «Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: теория и практика». Ч. II. Казань: Научный центр безопасности жизнедеятельности детей, 2012. С. 65–73.
- Витковская С. Е., Шестакова Е. В. Неоднородность роста и развития растений ячменя в условиях полевых и модельных экспериментов // Агрохимия. 2012. № 4. С. 51–59.
- Витковская С. Е. Оценка риска загрязнения агроэкосистем тяжелыми металлами // Агрохимия. 2013. № 11. С. 87–94.
- Витковская С. Е., Хофман О. В. Оценка экологического состояния агроэкосистем (на примере полевого опыта) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. 2013. Вып. 1. С. 103–113.
- Витковская С. Е., Дричко В. Ф., Хофман О. В. Оценка скорости нарастания биомассы сельскохозяйственных культур // Докл. РАСХН. 2014. № 1. С. 50–53.
- Витковская С. Е., Яковлев О. Н., Оглуздин А. С., Дубовицкая В. И. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на поведение тяжелых металлов в системе «почва – растение» // Проблемы агрохимии и экологии. 2014. № 3. С. 31–34.
- Витковская С. Е. Закономерности формирования биомассы и элементного состава растений ячменя в полевом опыте // Агрохимия. 2015. № 1. С. 63–72.
- Витковская С. Е. Закономерности динамики выноса питательных веществ растениями ячменя в полевом опыте // Агрохимия. 2015. №5. С. 38–45.
- Витковская С.Е., Яковлев О.Н., Шаврина К.Ф. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы // Агрохимия, 2016. № 7. С. 3–11.
- Витковская С. Е. Зависимость содержания подвижных соединений алюминия, марганца и железа в дерново-подзолистой почве от дозы мелиоранта // Материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления»). Санкт-Петербург, 21–23 сентября 2016 г. СПб: ФГБНУ АФИ, 2016. С. 395–399.
- Витковская С. Е., Яковлев О. Н. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение марганца и железа в системе «почва – растение» // Агрохимия. 2017. № 11. С. 44–51.
- Геохимия окружающей среды / Саэт Ю. Э., Ревич Б. А., Янин Е. П. и др. М.: Недра, 1990. 335 с.
- ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. М., 2006. 6 с.
- ГН 2.1.2511-09. Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 10 с.
- Гогмачадзе Г. Д. Агроэкологический мониторинг почв и земельных ресурсов Российской Федерации / под ред. Д. М. Хомякова. М.: МГУ, 2010. 592 с.
- ГОСТ 14050-93. Мука известняковая (доломитовая). Технические условия. Межгосударственный стандарт. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003. 12 с.



- ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести / Государственный стандарт союза ССР. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19.12.84.
- ГОСТ 26487-85. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО. Введ. 26.03.85 // Сб. гос. стандартов. Разработаны Мин. сельского хозяйства СССР. М.: Изд-во стандартов, 1985. С. 21–33.
- ГОСТ Р 54651-2011. Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2012. 18 с.
- ГОСТ Р 53117-2008. Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2009. 15 с.
- Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. Часть 2. Агрохимикаты. М., 2017. 46 с.
- Гребенникова В.В. Агроэкологическая оценка состояния дерново-подзолистой почвы и качества растениеводческой продукции при длительном сельскохозяйственном использовании в зоне интенсивной антропогенной нагрузки: Автореф. дисс.... канд. биол. наук. М.: МСХА, 1997. 17 с.
- Гришина А. В., Иванова В. Ф. Транслокация тяжелых металлов и приемы детоксикации почв // Химия в сельском хозяйстве. 1997. № 3. С. 36–41.
- Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
- Дричко В. Ф. Миграция химических элементов в биосфере и экологические проблемы применения удобрений. Лекция. Л.: ЛСХИ, 1990. 31 с.
- Дричко В. Ф., Изосимова А. А. Методика определения удельных скоростей роста растений и выноса ими химических элементов из почвы. Методические рекомендации. СПб: АФИ, 2011. 24 с.
- Игамбердиев В. М., Огородников Л. П. Экологическое нормирование применения химических мелиорантов из отходов промышленности. Сообщение 2. Определение уязвимого звена экосистемы // Химия в сельском хозяйстве, 1994. № 3. С. 29–30.
- Исидоров В. А. Введение в химическую экотоксикологию. Учебное пособие. СПб: Химиздат. 1999. 140 с.
- Кабата-Пендиас А., Х. Пендиас Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
- Карпова Е. А., Потатуева Ю. А., Касицкий Ю. И., Кобалия Е. А. Влияние длительного применения различных форм фосфорных удобрений на содержание кадмия, свинца, никеля и стронция в дерново-подзолистых почвах и растениях / Микроэлементы в биологии и их применение в сельском хозяйстве и медицине: Тезисы докл. XI Всесоюзн. конференции. Самарканд, 1990. С. 164.
- Качанова Л. С. Техничко-экономические критерии обоснования эффективности технологических процессов производства и использования удобрений // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2015. № 2(18). С. 188–205.
- Ковальский В. В. Стронциево-кальциевые субрегионы биосферы и биогеохимические провинции / Тр. биогеохимической лаборатории АН СССР. 1978. Т. 15. С. 22–128.
- Кузьмич М. А. Агроэкологическое обоснование применения нетрадиционных химических мелиорантов в земледелии России: дисс... доктора с/х. наук. М., 2004. 324 с.
- Лаврищев А. В. Изучение поведения стабильного стронция в агроэкосистемах Северо-запада России: дисс... доктора с/х наук, СПб., 2016. 272 с.
- Левинский Ю. В., Поддубский В. И., Подушко Ю. Н., Иванова Л. П. Проблемы переработки твердых бытовых отходов на Крайнем Севере. М.: ИРЦ Газпром, 1997. 53 с.
- Литвинович А. В. История известкования почв // Агрофизика. 2014, № 2(14). С. 45–51.
- Макарова В. Г., Цыганов А. Р., Мажайский Ю. А. Экологические и медико-социальные аспекты охраны природной среды и здоровья населения. Минск: БИТ «Хата», 2002. 286 с.
- Материалы оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) агрохимиката. Мука известняковая (доломитовая). Рудня, 2014. 32 с.

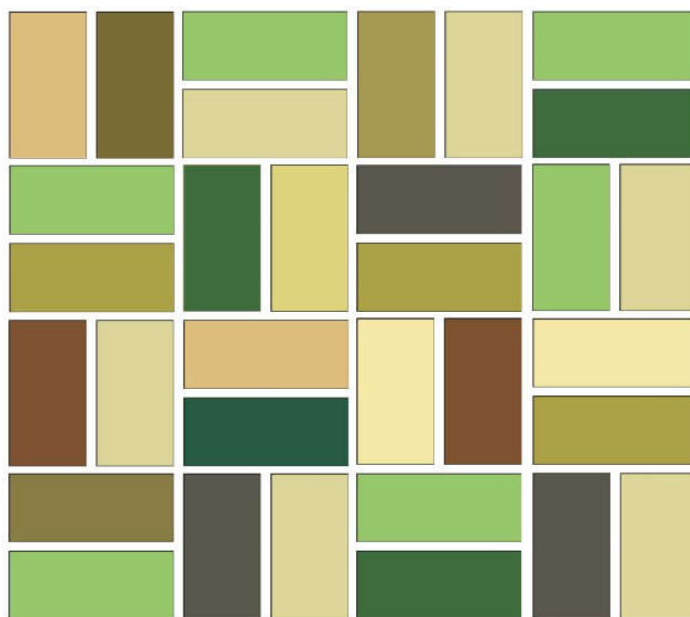
- Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. 240 с.
- Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Карбонатные породы. М., 2007. 37 с.
- Методические указания по проведению полевых опытов с удобрениями овощных культур в открытом грунте / Сост. Г. Г. Вендило, А. А. Скаржинский, Т. И. Вятлева, Н. М. Глунцов. М.: Колос, 1975. 47 с.
- Милащенко Н. З., Захаров В. Н. Производство экологически чистых и биологически полноценных продуктов питания // Химия в сельском хозяйстве 1991. № 1. С. 3–12.
- Минеев В. Г. Экологические проблемы агрохимии: Учебное пособие для вузов по специальности «Агрохимия и почвоведение». М.: МГУ, 1988. 282 с.
- Минеев В. Г. Проблема тяжелых металлов в современной земледелии. Тяжелые металлы и радионуклиды в агроэкосистемах. М.: МГУ, 1994. С. 5–12.
- Минеев В. Г. Агрохимия: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МГУ; «КолосС», 2004. 720 с.
- Минеев В. Г., Гомонова Н. Ф., Морачевская Е. В. Влияние длительного применения удобрений и известкования на биологические свойства почвы // Проблемы агрохимии и экологии. 2014. № 1. С. 3–9.
- Небольсин А. Н., Небольсина З. П. Известкование почв (результаты 50-летних полевых опытов). СПб.: ГНУ ЛНИИСХ Россельхозакадемии, 2010. 254 с.
- Небольсин А. Н., Небольсина З. П. Теоретические основы известкования почв. СПб.: ЛНИИСХ, 2005. 252 с.
- Носовская И. И., Соловьев Г. А., Егоров В. С. Влияние 8-летнего внесения фосфоритной муки различных месторождений на содержание микроэлементов и тяжелых металлов в почве // Вестник МГУ. 2001. Сер. 17. Почвоведение. № 2. С. 33–36
- Овсянников Ю. А. Теоретические основы эколого-биосферного земледелия. Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2000. 264 с.
- Овчаренко М.М. Тяжелые металлы в системе почва–растение–удобрение. - М.: ЦИНАО, 1997. - 287 с.
- Потатуева Ю. А., Касицкий Ю. И., Хлыстовский А. Д. и др. Влияние длительного применения фосфорных удобрений на накопление в почве и растениях тяжелых металлов и токсичных элементов // Агрохимия. 1994. № 11. С. 98–113.
- Проблемы деградации и восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения в России / под редакцией академиков Россельхозакадемии А. В. Гордеева, Г. А. Романенко. М.: Росинформагротех, 2008. 67 с.
- Рэуце К, Кырстя С. Борьба с загрязнением почвы. М.: ВО Агропромиздат, 1986. 221 с
- Савин И. Ю., Барталев С. А., Лупян Е. А., Толпин В. А., Хвостиков С. А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 275–285.
- СанПиН 2.6.1.2523–09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы. М., 2009. 70 с.
- СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М., 2001. 251 с.
- Самофалова И. А. Химический состав почв и почвообразующих пород: уч. пособие. Пермь: Пермская ГСХА, 2009. 30 с.
- Система применения удобрений: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальностям «Агрохимия и почвоведение», «Защита растений и карантин» / под ред. В. В. Лапы. Гродно: ГГАУ, 2011. 418 с.
- Словарь-справочник почвенно-экологических терминов / под ред. Б. Ф. Апарина, А. И. Попова: Учебное пособие. СПб.: СПГАУ, 2006. 287 с.
- Смирнов П. М. Проблемы азота в земледелии и результаты исследований с N<sup>15</sup> // Агрохимия. 1977. № 11. С. 3–36.

- Соколов О. А., Черников В. А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Книга 1. Атлас распределения тяжелых металлов в объектах окружающей среды. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1999. 164 с.
- Сюта Я., Васяк Г. Принципы естественного использования осадков сточных вод // Международный сельскохозяйственный журнал. 1983. № 2. С. 48–53.
- Теория и практика применения фосфогипса нейтрализованного в рисоводстве: методические рекомендации. Краснодар: ВНИИ риса, 2016. 40 с.
- ТУ 113-08-418-94. Фосфогипс для сельского хозяйства. Технические условия. Кирово-Чепецк: Уралхим, 1994.
- ТУ 2189-326-00008064-99. Удобрения известковые местные. Технические условия. М., 2009.
- ТУ 14-139-201-2012. Белит. Технические условия. Челябинск, 2012. 5 с.
- Тяжелые металлы в системе почва-растение-удобрение / под ред. М. М. Овчаренко. М.: ЦИНАО, 1997. 290 с.
- Шаврина К. Ф., Витковская С. Е. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка в растениях ячменя / Материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления». Санкт-Петербург, 21–23 сентября 2016 г. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. С. 382–386.
- Шаврина К. Ф. Взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва-растение: выпускная квалификационная работа. Научный доклад. СПб.: РГГМУ, 2017. 103 с.
- Шильников И. А., Лебедева Л. А. Известкование почв / И. А. Шильников, А. Лебедева. М.: Агропромиздат, 1987. 170 с.
- Шильников И. А., Сычѳв В. Г., Зеленов Н. А., Аканова Н. И., Федотова Л. С. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. 340 с.
- Шильников И. А., Аканова Н. И., Гришин Г. Е., Зеленов Н. А. Эффективность воздействия известкования почв на урожай и качество картофеля // Нива Поволжья. 2010. № 3(16). С. 50–53.
- Федеральная целевая программа «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы». М., 2013. 223 с.
- Химическое загрязнение почв и их охрана: Словарь-справочник / Орлов Д. С., Малинина М. С., Мотузова Г. В. и др. М.: Агропромиздат, 1991. 303 с.
- Черников В. А. Агроэкология. Модуль 6. Сельскохозяйственная экология. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2002. 102 с.
- Эколого-экономические основы и рекомендации по известкованию, адаптированные к конкретным почвенным условиям / под ред. А. Н. Небольсина, В. Г. Сычева. М.: ЦИНАО, 2000. 80 с.
- Экономика сельского хозяйства: краткий курс лекций для студентов направления подготовки 38.03.01 «Экономика» / Сост. Зуева Е. И., Лиховцова Е. А. // ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. Саратов, 2016. 82 с.
- Berrow M. L. An overview of soil contamination problems. In *Chemicals in the environment* / Eds. Lester J., Perry R., Sterritt R. London, 1986. P. 543–552.
- Kpromblekou A. K., Tabatabai M. A. Metal contents of phosphate rocks // *Commun. Soil. Sci. and Plant Anal.* 1994. Vol. 25. № (17–18). P. 2871–2882.
- Schulz R., Romheld V. Recycling of municipal and industrial organic wastes in agricultural: Benefits, limitations, and means of improvement // *Soil Science and plant nutrition.* 1997. Vol. 43. Special issue. P. 1061–1056.
- <http://epa.gov/iris/substindex.html>. Integrated Risk Information System (IRIS). URL.

ISSN 2222-0666

# Агрофизика

ежеквартальный научный журнал



Агрофизический научно-исследовательский институт

Журнал «Агрофизика» издается с 2011 года.

С 7 декабря 2015 г. журнал включен в утвержденный ВАК Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Адрес редакции:

Российская Федерация, 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14,

Тел.: (812) 534 10 89, факс: (812) 534 19 00

E-mail: [agrophysica@mail.ru](mailto:agrophysica@mail.ru)

Internet: <http://www.agrophys.ru>

Свидетельство о регистрации  
средства массовой информации ПИ № ФС77-39992 от 21 мая 2010 г.  
Журнал включен в систему РИНЦ

*Научное издание*

ISBN 978-5-905200-35-9



*Витковская Светлана Евгеньевна*

Методы оценки эффективности и экологической безопасности  
химических мелиорантов

Технический редактор: *Андрей Цивилёв*

---

Подписано в печать 19.10.2017. Заказ № 5.  
Отпечатано в ФГБНУ АФИ  
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14.  
Тираж 300 экз.

