

О.Н. ДИДМАНИДЗЕ, А.В. ЕВГРАФОВ, Н.Н. ПУЛЯЕВ,
А.С. ГУЗАЛОВ, Д.А. ФИЛИМОНОВ, А.В. КУРИЛЕНКО

**МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ
УТИЛИЗАЦИИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ
СТОКОВ НА ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКИХ
ПОЛЯХ ОРОШЕНИЯ**



МОНОГРАФИЯ

Москва, 2024

Российский государственный аграрный университет-МСХА
имени К.А. Тимирязева

О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов, Н.Н. Пуляев,
А.С. Гузалов, Д.А. Филимонов, А.В. Куриленко

**МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ
БЕЗОПАСНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ
СТОКОВ НА ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКИХ ПОЛЯХ ОРОШЕНИЯ**

Монография

Москва 2024

УДК 631.6.02:631.862

Рецензенты:

доктор сельскохозяйственных наук, профессор – Кобозева Тамара Петровна, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

доктор технических наук, доцент – Максимов Сергей Алексеевич, ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»

Методика обеспечения экологически безопасной утилизации животноводческих стоков на земледельческих полях орошения.

О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов, Н.Н. Пуляев, А.С. Гузалов, Д.А. Филимонов, А.В. Куриленко – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2024. – 164 с.

ISBN 978-5-00227-323-2

В монографии рассмотрены вопросы, связанные с проблемой утилизации сточных вод животноводческих комплексов и их влияние на окружающую среду, так как они являются наиболее интенсивными загрязнителями по сравнению к другим стокам и обладают высокой удобрительной ценностью, тем самым представляя наибольший интерес для сельского хозяйства. Для решения данной проблемы предложена нелинейная изотерма сорбции аммония ППК, позволяющая вести расчёты при больших концентрациях последнего в почвенном растворе и вместе с тем при малых концентрациях реализуя закон Генри. Разработаны численные алгоритмы расчёта на ЭВМ процессов миграции влаги и азотных соединений и их трансформаций в почвах и подстилающих грунтах. Составленная программа позволяет прогнозировать изменение экологической ситуации при учёте реальных почвенных, гидрогеологических и стохастических погодных условий индивидуально за каждый рассматриваемый год в составе исследуемого промежутка времени.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся исследованиями и проектированием систем утилизации животноводческих стоков на земледельческих полях орошения, а также для бакалавров, магистров и аспирантов.

ISBN 978-5-00227-323-2

УДК 631.6.02:631.862

© ООО «Сам Полиграфист»,
2024

Содержание

Введение	5
Глава 1. Утилизация и рациональное использование сточных вод животноводческих комплексов в сельском хозяйстве	7
1.1. Современное состояние вопроса	7
1.2. Факторы, влияющие на деградацию и загрязнение агроландшафтов	12
1.3. Геохимические барьеры.....	25
1.4. Экологические аспекты утилизации сточных вод животноводческих комплексов	32
1.5. Технология подготовки животноводческих стоков.....	44
Глава 2. Моделирование совместного передвижения влаги и азотных соединений в почве и подстилающих грунтах.....	51
2.1. Формы содержания и превращения азота в почвах.....	51
2.2. Моделирование передвижения влаги в почве.....	54
2.3. Начальные и граничные условия для моделирования влагопереноса.....	62
2.4. Моделирование передвижения азотных соединений в почве	67
2.5. Константы нитрификации и денитрификации	70
2.6. Отбор азотных соединений корнями растений.....	73
2.7. Граничные условия	75
2.8. Модель продуктивности растений	77
Глава 3. Сравнение экспериментальных исследований и математического моделирования передвижения азота в почве.....	80
3.1. Характеристика объекта исследования.....	80
3.2. Методы определения содержания ионов NH_4^+ и NO_3^- в почве	84
3.3. Сравнение результатов исследования с расчетными данными.....	85
Глава 4. Исходные данные для прогнозов	88
4.1. Почвенно-географические условия исследуемых областей	88
А) Бореальный биоклиматический пояс	94
Центральная таёжно-лесная область.....	94
Б) Суббореальный биоклиматический пояс	98

Центральная лесостепная и степная область.....	98
4.2. Культуры, выращиваемые на полях, при утилизации сточных вод животноводческих комплексов.....	107
Глава 5. Моделирование передвижения азота в почве и подстилающих грунтах при утилизации животноводческих стоков на полях орошения	110
5.1. Общая реализация математической модели.....	110
5.2. Водный режим областей.....	111
5.3. Определение безопасных концентраций азотных соединений, в сточных водах животноводческих комплексов с применением цифровых технологий.	117
5.4. Моделирование трансформации азотных соединений в почве.....	122
5.5. Распределение азотных соединений в геохимических барьерах	126
5.6. Динамика поступления нитратных соединений в грунтовые воды.....	133
5.7. Расчёт экологически безопасной нормы внесения животноводческих стоков на сельскохозяйственных полях орошения в зависимости от природно-климатических условий с использованием цифровых технологий	138
Основные положения экологически безопасной утилизации животноводческих стоков на сельскохозяйственных полях орошения с использованием цифровых технологий.....	142
Библиографический список.....	145

Введение

Сточные воды содержат различные вещества, которые можно использовать для выращивания сельскохозяйственных продуктов. Наиболее ценными в этом отношении являются сточные воды животноводческих ферм, так как они содержат большое количество питательных веществ, необходимых для роста и развития растений. Среди веществ, содержащихся в жидких стоках после их разделения на твердые и жидкие, наиболее подвижными и опасными с позиции экологической безопасности являются соединения азота: нитраты NO_3 и аммонийный азот NH_4 .

Наиболее эффективным и экономически целесообразным методом считается использование сточных вод животноводческих комплексов на орошаемых полях при выращивании сельскохозяйственной продукции. Растительность, почвенный покров и нижележащие слои почвы орошаемых полей, являются геохимическими барьерами на пути движения веществ, содержащихся в сточных водах. Для повышения эффективности геохимических барьеров необходимо создание оптимальных режимов водного, воздушного и питательных веществ для земель, орошаемых сточными водами.

При использовании сточных вод на орошаемых полях также необходимо контролировать количество поступающих веществ, их перераспределение между геохимическими барьерами, чтобы избежать загрязнения подземных вод азотом и другими соединениями, для недопущения ухудшения экологической ситуации.

Следует отметить, что основное количество работ посвящённых проблеме утилизации и очистке сточных вод животноводческих комплексов рассматривали данную проблему по схеме: технология подготовки → внесение → получение урожая. Экологической стороне вопроса внимания уделяется мало, хотя даже при подсчёте нормы внесения заложен коэффициент использования азота травами 0.7, а фактически 30 % остаются неиспользованными.

Таким образом, учет совместного движения влаги и веществ в почве и подстилающих почвах, продуктивности растений с учетом стохастических свойств метеорологических условий позволяют разработать на основе прогнозов долгосрочную перспективу, оптимальные сценарии внесения сточных вод животноводческих комплексов, исключающие или минимизирующие загрязнение почв, грунтов и подземных вод.

Глава 1. Утилизация и рациональное использование сточных вод животноводческих комплексов в сельском хозяйстве

1.1. Современное состояние вопроса

В настоящее время мало внимания уделяется проблемам сохранения и восстановления плодородия почв мелиорированных земель, выведенных из оборота.

Объем вносимых в почву органических и минеральных удобрений составляет от 10 до 15% от потребности. Продуктивность почвы снижается из-за уменьшения содержания гумуса на очень больших площадях. За последние 20 лет запасы гумуса в РФ уменьшились на 25-30%, годовые потери достигают 81,4 млн. тонн. Около 50% пахотных земель страны характеризуются низким содержанием гумуса, 37% – низким содержанием гумуса и образованием подвижных форм фосфора, 24% – нуждаются в известковании и химической обработке.

Потери гумуса на территории Русской равнины за последние 30-40 лет составили треть от его общего содержания. Из-за процессов эрозии плодородный слой сократился на 10-15 см. Около 100 миллионов гектаров сельскохозяйственных земель нуждаются в различных мелиоративных мероприятиях [1,2,3,4].

Основными негативными процессами, приводящими к деградации почвенного покрова, являются: водная и ветровая эрозия (дефляция), заболачивание, затопление, уплотнение, дегумификация, а также недостаточное увлажнение почвы в период вегетации сельскохозяйственных культур (рисунки 1.1, 1.2, 1.3, 1.4).



Рисунок – 1.1 Водная эрозия почвы



Рисунок – 1.2 Ветровая эрозия почвы



Рисунок – 1.3 Переувлажнение и заболачивание почвы



Рисунок – 1.4 Подтопление почвы

Одним из объектов защиты окружающей среды являются почвы, поверхностные и подземные воды, в частности динамика их использования, связанная с деятельностью человека, постоянно меняющаяся во времени и пространстве. Это приводит к необходимости рассматривать антропогенный фактор как важнейший, влияющий на изменение почвенно-земельных ресурсов территории любого таксономического уровня [5].

Основными элементами системы земледелия на агроландшафтной основе являются меры по защите почв от водной и ветровой эрозии, организация территории и севооборотов, обработка почвы, система удобрений, мелиорация земель [6].

На современном этапе агроландшафты подвергаются различным техногенным воздействиям, связанными с уровнем агротехники, видами используемых удобрений и т.д.

Современная теория агроландшафтного земледелия ориентирована на:

- организацию и ведение экологически сбалансированных систем земледелия на основе фундаментальных знаний;
- исследование закономерностей организации ландшафтных систем и функционирования их регионов;
- внедрение методов моделирования агроландшафтов с целью восстановления систем земледелия с помощью основных средств управления агроландшафтными системами;
- более обдуманную систему проектирования агроландшафтных систем земледелия, определяющих высокую степень их экологичности.

Агроландшафтные системы создаются в результате взаимодействия природно-территориальных комплексов (рисунок 1.5), сельскохозяйственных систем и мелиоративных мероприятий.

Таким образом, агроландшафтные системы классифицируются на основе выявления природно-территориальных комплексов и установления их связей с различными сельскохозяйственными структурами, что является предметом агротерриториального анализа.



Рисунок – 1.5 Структура природно-техногенных комплексов

В настоящее время остро стоит проблема, связанная с загрязнением сельскохозяйственных ландшафтов и водоемов в результате хозяйственной деятельности животноводческих предприятий агропромышленного комплекса, рисунок 1.6, при которой образуется большое количество животноводческих сточных вод. Высокая удобрительная ценность животноводческих стоков должна использоваться для повышения и сохранения плодородия почв. При этом необходимо придерживаться экологических принципов их безопасного использования на основе системы экологических ограничений использования

земель мелиорированного сельскохозяйственного ландшафта с учетом агроэкологического состояния угодий.



Рисунок – 1.6 Загрязнение агроландшафтов и водных объектов от хозяйственной деятельности животноводческих предприятий АПК.

1.2. Факторы, влияющие на деградацию и загрязнение агроландшафтов

Основными факторами, ведущими к деградации и негативным экологическим последствиям сельскохозяйственных ландшафтов, включая земли, которые были изъяты из оборота, и как следствие, потере плодородия

земель и снижению урожайности и качества сельскохозяйственной продукции, являются:

- 1) периодическое или постоянное переувлажнение сельскохозяйственных ландшафтов;
- 2) недостаток влаги в почве в период вегетации сельскохозяйственных культур;
- 3) климатические факторы стока и коэффициент влажности земель;
- 4) водная эрозия почвы;
- 5) загрязнение элементов сельскохозяйственных ландшафтов, таких как почва, нижележащие слои, грунтовые и поверхностные воды, в результате хозяйственной деятельности.

Подтопление агроландшафтов зависит от типов водного питания территории, водного баланса, то есть от соотношения прихода и расхода влаги за определенный интервал времени.

На выбывших из оборота мелиорированных землях подтопление зависит от состояния осушительной системы и гидротехнических сооружений на ней.

По степени естественного увлажнения все агроландшафты можно разделить на три группы (рисунок 1.7) по коэффициенту увлажненности территории α , который определяется через отношение выпавших осадков к испарению за определенный период:

1) **неустойчивое увлажнение**, то есть количество осадков и испарений примерно равно, коэффициент увлажнения территории $\alpha \approx 0,8-1,2$. В этом случае осадки в течение года могут быть неравномерными, большая часть осадков может выпадать в межвегетационный период, то есть в сезон вегетации их недостаточно.

И наоборот, когда больше всего осадков выпадает в течение вегетационного периода, будет избыток влаги. В этом случае, несмотря на одинаковое количество осадков, и испарений, необходимо проведение ирригационных и осушительных мероприятий для регулирования водного режима территории;



Рисунок – 1.7. Степень естественного увлажнения территории РФ.

2) **избыточное** увлажнение, коэффициент увлажнения территории $\alpha > 1,2$.

В этом случае избыток влаги приводит к недостатку кислорода в почвенном слое, оглеению почв, появлению в нем кислотных форм и, как следствие, к переувлажнению почвы и образованию болот. Эти процессы ухудшают условия для роста и развития растений. В этом случае без осушительных мероприятий не обойтись;

3) **недостаточное** увлажнение, т.е. $\alpha < 0,8$. Недостаток влаги также приводит к угнетению жизненно важных процессов роста и развития растений, и в этом случае необходимы мероприятия по ирригации.

Осадки оказывают огромное влияние на заболачивание сельскохозяйственных ландшафтов, хотя это не единственная причина. Переувлажненные районы расположены в основном там, где годовое количество осадков превышает испарение, что требует ирригационных и осушительных мероприятий для ведения хозяйственной деятельности.

Высокий уровень грунтовых вод приводит к дефициту кислорода в почвенном и корневом слое, т.е. анаэробному режиму сельскохозяйственных ландшафтов.

При малом содержании воздуха ухудшается аэрация, увеличивается концентрация углекислого газа в почве, а содержание кислорода снижается, что приводит к нарушению аэробного дыхания и появлению гликолиза. Продукты гликолиза подавляют рост корней.

Повышению концентрации углекислого газа способствует также интенсивная минерализация органических веществ в верхних слоях почвы над уровнем грунтовых вод, что увеличивает поступление минеральных соединений в грунтовые воды и приводит к их загрязнению, а также к интенсивному непродуктивному разложению гумуса, снижению плодородия почв и деградации сельскохозяйственных ландшафтов.

Аэрация почвы оценивается по газовой диффузии, которая является основным фактором аэрации, и зависит от объема пор без воды. Следовательно, содержание воздуха в почве является показателем аэрации. Для обеспечения нормальной аэрации необходимо удалить лишнюю влагу, чтобы освободить необходимое количество пор от воды.

В условиях переувлажнения почвы значительную часть времени летом, постоянно весной и осенью почва почти полностью лишена воздуха.

Негативное влияние избытка влаги на растения проявляется не только снижением воздушности почвы и ухудшением аэрации, но и непосредственно в виде затопления корневых систем.

При осушении земель сельскохозяйственного назначения следует учитывать их характеристики. Раннее освобождение верхних горизонтов почвы от воды способствует лучшему их прогреванию.

Недостаток влаги в почве в период вегетации сельскохозяйственных культур приводит к снижению их урожайности.

С начала 90-х годов прошлого века наблюдается усиление нестабильного режима увлажнения в природно-климатических зонах Российской Федерации, что отрицательно сказывается на развитии сельскохозяйственных культур в период вегетации. Теплый период года становится длиннее и жарче, в результате общее испарение увеличивается, а количество осадков в теплый период остается неизменным или уменьшается. Повышение вероятности

низких урожаев может стать опасной из-за увеличения частоты засушливых периодов.

Уменьшение урожайности и валового сбора зерновых в засушливые годы достигает 40 % и более по сравнению с годами, благоприятными по увлажнению [7].

Снижение негативных последствий усиления засушливости климата за счет улучшения водного режима почв может быть достигнуто применением ирригационных систем.

С усилением климатических засух в почвах усиливается проявление таких отрицательных свойств, как карбонатность, низкое содержание гумуса, изменение структуры почвенного покрова [8].

Дефицит атмосферных осадков ограничивает повышение плодородия почвы за счет применения удобрений, потому что при недостатке влаги в почве внесенные удобрения совсем не растворяются или вообще не растворяются. Около 33% пахотных земель в Российской Федерации в той или иной степени испытывают недостаток атмосферной влаги и подвержены засухе.

Продолжительность засух колеблется на разных территориях от нескольких дней до 3-4 месяцев (средняя за год - 15 дней, самая большая за сезон - 38-52 дня). Засухи носят нерегулярный характер и их трудно предсказать, но на рубеже 21 века прослеживается четкая закономерность их увеличения. На юге Волго-Вятского и Центрального регионов засухи случаются раз в пять-шесть лет. Кроме того, на больших территориях засухи разной силы и продолжительности могут повторяться два года подряд, локальные - три и более года [9].

Для нормального развития растений необходимо оптимальное содержание влажности, минеральных элементов питания и благоприятная температура почвы и атмосферного воздуха [10].

Количество осадков и испаряемость не дают полной характеристики запасов влаги в почве. Большое значение имеют рельеф, экспозиция склонов, гранулометрический состав, структурность почвы и содержание гумуса в ней. Основными источниками влаги для растений являются осадки, грунтовые воды, запасы влаги в почве после снеготаяния, а также орошение.

Бесперебойно обеспечивать возделываемые сельскохозяйственные культуры водой в необходимом количестве с целью получения стабильных урожаев без нарушения экологического равновесия в окружающей среде – главная задача орошения [11].

Режим орошения напрямую зависит от культуры, фазы развития растений, свойств почвы и климатических условий. Наиболее распространенным является назначение поливов по влажности почвы, и нахождение ее оптимальных границ. Оптимум для разных культур находится в пределах от 60 до 100 %. Обычно за верхнюю границу диапазона продуктивной влаги принимают влажность почвы, соответствующую НВ [90, 144, 170]. А.А. Роде [12] считает, что критической влажностью, является влажность выше ВЗ. Это содержание и является нижним пределом оптимальной влажности.

Величина нижнего предела оптимальной влажности зависит от гранулометрического состава почвы [13]. В настоящее время установлено, что, например, для многолетних трав наиболее оптимальная влажность суглинистых почв находится в пределах 70-85 % НВ.

Однако в большинстве случаев оптимальным оказывается предел 70-100% НВ, хотя насыщение влагой корнеобитаемого слоя почвы до 100% НВ не всегда целесообразно, так как в случае последующего выпадения осадков возможно усиление процесса вымывания питательных веществ и нарушение рационального водно-воздушного режима [14].

При поддержании влажности в слое почвы занятом корнями растений в диапазоне 70-90% НВ создаются наиболее благоприятные условия для роста растений, повышается коэффициент использования удобрений, достигается эффективное использование водных ресурсов.

При недостатке влаги в почве растениями не реализуется ни высокий фотосинтетический потенциал, ни высокий агрофон. При достаточном уровне минерального питания в 70% случаев лимитирующим фактором урожайности является недостаток влаги.

Опытные и производственные данные [15] показывают, что прибавка урожая сельскохозяйственных культур от орошения 11-103% (в среднем на

44%), от удобрений – 7-80% (в среднем 27%), от совместного применения орошения и удобрений – 41-205% (в среднем на 116 %).

Орошение оказывает многостороннее действие на физические свойства почвы и в целом на ее плодородие [16]. Повышение плотности почвы на орошаемых участках происходит за счет технологических нагрузок при поливе, уходе и уборе урожая, в целом риск переуплотнения почв происходит за счет совокупного влияния осадков, орошения и сельскохозяйственной техники и в первую очередь на суглинистых и глинистых почвах. Чем сильнее уплотнена почва, тем медленнее происходит ее разуплотнение.

Микроорганизмы, участвующие в гумусообразовании, в почвах достаточного увлажнения, активно трансформируют органическое вещество. Интенсивность разложения органического вещества зависит от температурных условий и наличия влаги в почве. Оптимальными условиями для развития микроорганизмов считается влажность 60-80% НВ и температура 15-25°C.

При поливах в условиях теплого периода в почвах создаются благоприятные условия для деятельности микроорганизмов, обеспечивающие биологическую и ферментативную активность [17].

К основным климатическим факторам стока относятся атмосферные осадки, температура и влажность воздуха, а также температура испаряющей поверхности. Влияние осадков проявляется через интенсивность их выпадения. Осадки, выпадающие в виде ливней, в большей степени расходуются на сток, чем осадки слабой интенсивности. Осадки, выпадающие на сухую поверхность почвы в малых количествах, особенно в лесу, вообще не образуют стока. Осадки в виде снега накапливают воду к весне и при интенсивном снеготаянии с наступлением высоких температур воздуха образуют интенсивный сток. При низких температурах воздуха весной снеготаяние растягивается, сток происходит медленно, вследствие чего значительное количество воды расходуется на испарение и фильтрацию.

Температуры воздуха и почвы оказывают постоянное влияние на испарение. Температура, повышаясь, способствует уменьшению стока.

Особенно усиливается испарение при высокой температуре воздуха и малой его относительной влажности в ветреную погоду.

Виды водной эрозии почв территорий Центрального района Нечерноземной зоны, расположенной в центральной части Среднерусской возвышенности, зависят от рельефа, климатических и гидрогеологических условий. В районе заметно выражены эрозионные процессы, 3,5 млн.га земель эродированы, из них 2,5 млн.га пашни [18].

Наиболее распространенным видом эрозии является водная, которая в России наиболее выражена по правобережью рек Волги, Дона, Десны и их притоков, на Валдайской, Средне-Русской, Приволжской, Клинско-Дмитровской, Ставропольской возвышенностях, в Приуралье, Высоком Заволжье, на Общем Сырту, в приречных зонах сибирских рек, особенно Оби, Иртыша и их притоков; на Кавказе, Урале, Алтае и в Забайкалье.

В последнее время эрозия почв получает значительное распространение в арктических районах России в местах разведки и освоения газово-конденсатных месторождений.

Развитию процессов водной эрозии в Центральном районе Нечерноземной зоны способствует большое разнообразие метеорологических условий, расчлененность рельефа, невысокая водопроницаемость и влагоемкость почв, слабая водопроходимость их структурных агрегатов, глубокое промерзание и медленное оттаивание почвы, образование ледяного экрана на ее поверхности, мощное отложение снега и во многих районах его интенсивное таяние, и как следствие, значительный сток талых вод.

Водная эрозия возникает под воздействием дождевых капель и водного потока. Различают следующие формы водной эрозии:

- капельную, возникающую от ударов дождевых капель;
- струйчатую, вызывающую небольшие промоины, не препятствующие обработке почвы;
- овражную, возникающую из струйчатой, если ее размеры не могут быть сглажены при обработке почвы;
- береговую (в зависимости от концентрации поверхностного стока).

Эрозия ирригационная – это смыв и размыв почвы при ее орошении, является формой антропогенной эрозии и водной эрозии. Эрозионные процессы увеличиваются при наложении ирригационной эрозии на естественную.

Водная эрозия возникает в случае, когда выпадающие осадки не успевают впитываться в почву, накапливаясь на поверхности, образуют лужи, а затем – сток. Если же водопроницаемость почвы значительно превосходит интенсивность выпадения осадков, то поверхностного стока и связанной с ним эрозии не возникает. Эрозия почвы при дождевании может быть вызвана:

- низкой впитывающей способностью почвы;
- высокой интенсивностью искусственного дождя.

В современный период интенсивность оврагообразования более чем в 2 раза выше, чем была ранее.

Анализ данных по влиянию овражной эрозии на почвенный покров показал, что в хозяйствах, сильно пораженных оврагами, площадь пашни на 10...15% меньше по сравнению с хозяйствами, где оврагов мало. Из-за роста оврагов за последние 150...200 лет площадь пашни уменьшилась в Курской области на 50 тыс. га, в Самарской – на 166 тыс. га, а в Воронежской – более чем на 400 тыс. га. Всего же в странах СНГ овраги ежегодно разрушают 100...150 тыс.га земель [19].

Наибольший вред наносит склоновая водная эрозия (смыв и размыв) и овражная.

Интенсивность водной эрозии во многом зависит от рельефа, крутизны, длины и экспозиции склона (рисунок 1.8), количества и распределения осадков, гранулометрического состава и водопроницаемости почвы, режима поверхностного стока, растительности.

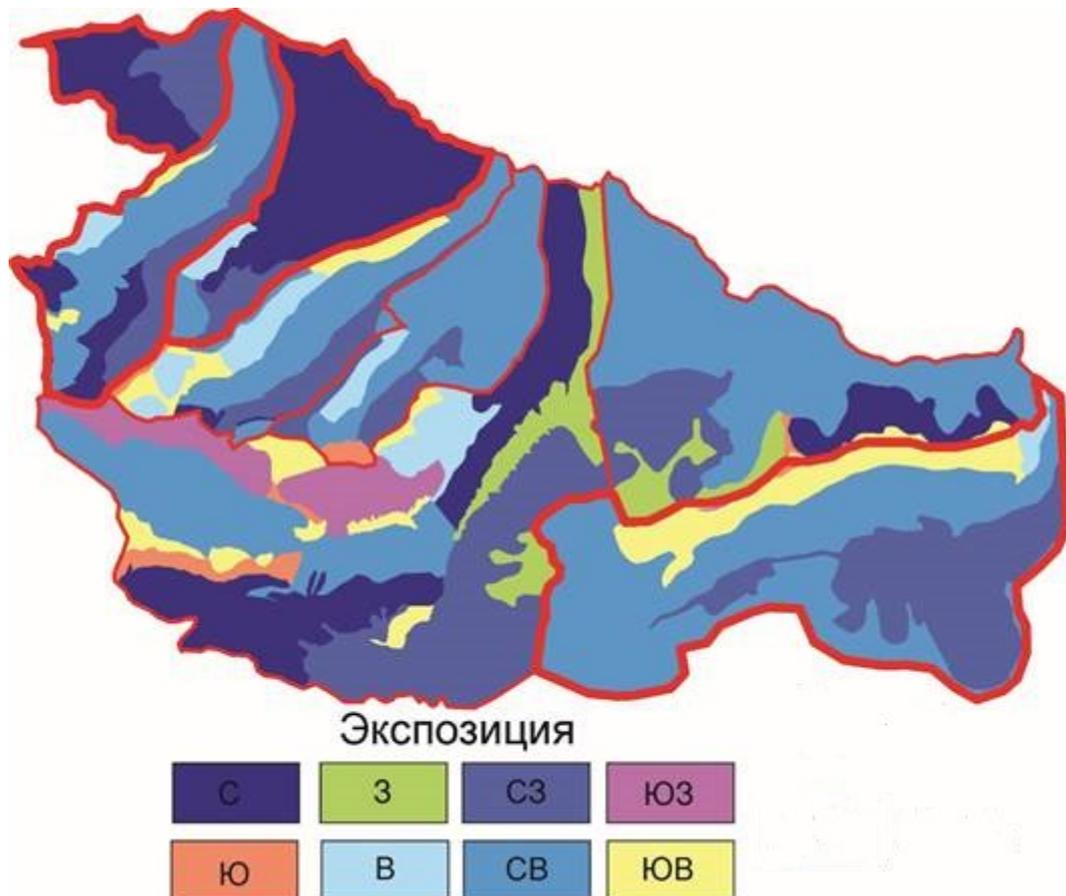


Рисунок – 1.8 Экспозиция склонов

Увеличению эрозии способствует также глубокое промерзание почвы вследствие сокращения инфильтрации в период снеготаяния [20].

Существует прямая зависимость между физическими свойствами почв и процессами эрозии. Структурность, наличие высокого удельного веса гумуса повышают противозерозионную устойчивость.

На эрозию влияет и экспозиция склона, это связано с различиями микроклимата, почв и растительности на склонах разной экспозиции (наибольшее влияние фактора экспозиции на эрозию – от стока талых вод).

Потери почвы при эрозионных процессах имеют различную интенсивность. Термин «норма эрозии» означает ту предельную интенсивность разрушения почвы, которая компенсируется процессами почвообразования.

Допустимой нормой эрозии считаются потери почвы от 2,25 до 11,5 т/га в год. Эти величины соответствуют данным о скорости почвообразования из валунной глины вблизи поверхности, составляющей около 6,75 т/га в год в центральной части РФ. Норма эрозии устанавливается прямо пропорционально мощности корнеобитаемого слоя. Так, для корнеобитаемых слоев мощностью

25; 25...50; 50...100; 100...50 и 150 см соответственно устанавливают нормы эрозии: 2,2; 4,5; 6,7; 7,9; и 11,2 т/га год.

Допустимая норма смыва – 0,5 – 2,0 т/га в год в зависимости от типа почвы, степени ее смывтости и плотности материнской породы – является сейчас наиболее приемлемой [21].

Потери гумуса практически невозможно восстановить в современных антропогенных условиях, несмотря на восстановление содержания органического вещества.

Гидрогеологические свойства почвенного покрова, генетические типы, механический состав в основном влияют на инфильтрационную и водоудерживающую способность. При слабой инфильтрационной способности и высокой плотности создается значительный склоновый сток.

Высокая водоудерживающая способность повышает влажность почвы, снижает ее инфильтрационную способность и, следовательно, увеличивает поверхностный сток. Поэтому важной характеристикой почвогрунтов является их интенсивность впитывания (слой воды на единицу площади в единицу времени), который зависит от их плотности.

Важную роль при формировании поверхностного стока играет рельеф, который определяется геологическим строением: уклон склона, длина склона, площадь водосбора, с увеличением которой энергия стока возрастает. Рельеф также влияет на водно-физические свойства почв.

Главным фактором формирования стока и развития эрозии является интенсивность осадков и водно-физические свойства почв.

Наблюдениями установлено, что при дождях слоем 5... 8 мм, но большой интенсивности, особенно при выпадении их на почву с высокой плотностью и низкой инфильтрационной способностью, может возникнуть эрозия. Усиление эрозии связано с увеличением размера капель дождя, которые разрушают комочки почвы, уплотняют ее и снижают проницаемость.

Эрозия может быть вызвана также стоком талых вод, в этом случае она зависит от мощности снежного покрова, глубины промерзания и интенсивности снеготаяния. В северных областях центрально-черноземной полосы сток талых

вод составляет 80...90 мм, в южных – 40...50 мм; в Центральном районе (Московская, Тульская, Калужская, Рязанская области) – 90...100 мм; на Приволжской возвышенности – 30...60 мм.

Важно учитывать и эрозию, вызываемую естественными осадками на орошаемых землях, которая может быть значительно больше, чем на неорошаемых, в связи с потеплением климата, и как следствие, изменения водно-физических свойств почвы и энергии почвообразования.

Эрозия начинается с нарушения водного режима почвы, на который значительное влияние имеет изменение климата. Овладеть водным режимом территории – значит обеспечить управление формированием урожая, повысить его устойчивость.

В настоящее время природа является как средой обитания и размещения человека, так и приёмником всевозможных отходов, образующихся в процессе его деятельности, то есть подвергается активному загрязнению.

Под загрязнением среды подразумевается поступление в окружающую среду продуктов техногенеза, оказывающие вредное воздействие на человека и другие живые организмы, биологические компоненты, и обуславливающие негативные токсико-экологические последствия [22, 23, 24, 31, 75]. Часть загрязняющих веществ нейтрализуется средой, а часть перераспределяется между компонентами природы.

Для описания загрязнения необходимо учитывать различные механизмы поступления загрязняющих веществ: с атмосферными осадками, поливной водой, при обработке химикатами и утилизация животноводческих стоков.

Для предотвращения загрязнений одной из необходимых мер является осуществление мониторинга за состоянием окружающей среды.

Эта мера повышает экологическую безопасность функционирования объектов сельскохозяйственного, назначения и позволяет своевременно и правильно предотвращать или минимизировать загрязнения.

Периодическое подтопление и загрязнение приводит агроландшафты к состоянию «экологического кризиса».

Гидротехнические мелиорации культур становятся одним из основных инструментов для получения конкурентных урожаев, а также являются основным фактором для восстановления агроресурсного потенциала агроландшафтов и сохранения плодородия почв.

Общими принципами обеспечения экологической безопасности, водоресурсного обеспечения агроландшафтов, включающих выбывшие из оборота мелиорированные земли являются:

- презумпция экологической опасности всякой производственно-хозяйственной деятельности;
- обязательность экологической экспертизы производственно-хозяйственной и иной деятельности, представляющей или могущей представлять экологическую опасность;
- осуществление такой деятельности при наличии положительного заключения экологической экспертизы;
- обязательное лицензирование производственно-хозяйственной деятельности, представляющей экологическую опасность;
- запрещение, приостановление или ограничение всякой экологически опасной деятельности;
- государственный и общественный надзор и контроль за обеспечением экологической безопасности.

Основными принципами безопасного водоресурсного обеспечения выбывших из оборота мелиорированных земель, с целью возвращения их в сельскохозяйственный оборот являются:

- разработка системы экологического мониторинга в пределах подлежащей рекультивации территории;
- разработка концепции гидротехнических мелиораций и охраны земель от подтопления и переувлажнения земель;
- разработка оптимального водного режима, предотвращающего деградацию почвы восстанавливаемого агроландшафта и способствующего восстановлению ее плодородия;

- разработка экономического обоснования применяемых технологий с целью возвращения выбывших из оборота мелиорированных земель;
- разработка сценариев получения оптимальных урожаев на основе выше перечисленных принципов при условии предотвращения ущерба окружающей среде, с использованием животноводческих стоков, что позволит решить проблему их утилизации и повысить плодородие малопродуктивных и выбывших из оборота мелиорируемых земель.

Необходимость применения гидротехнических мелиораций становится все более очевидной в связи с изменением климатических условий в сторону потепления, и как следствие, повышения температур воздуха, неравномерного выпадения осадков и уровня грунтовых вод, в различные периоды роста и развития сельскохозяйственных растений.

1.3. Геохимические барьеры

В настоящее время природа является как средой обитания и размещения человека, так и приёмником всевозможных отходов, образующихся в процессе его деятельности, то есть подвергается активному загрязнению.

Проблема защиты природы от загрязнения может быть эффективно решена на основе геосистемного (ландшафтного) подхода.

Под геосистемой понимают пространственно-временной комплекс географических компонентов, взаимообусловленных в своём размещении и развивающихся как единое целое (рисунок 1.9) [75]. Геосистемы обладают определенной структурой, организацией, динамикой, иными словами они обладают способностью обратимо изменяться во времени без перестройки структуры если воздействия не превышают пороговых уровней, а также динамикой, то есть эволюционными необратимыми изменениями, в результате которых образуются новые геосистемы.

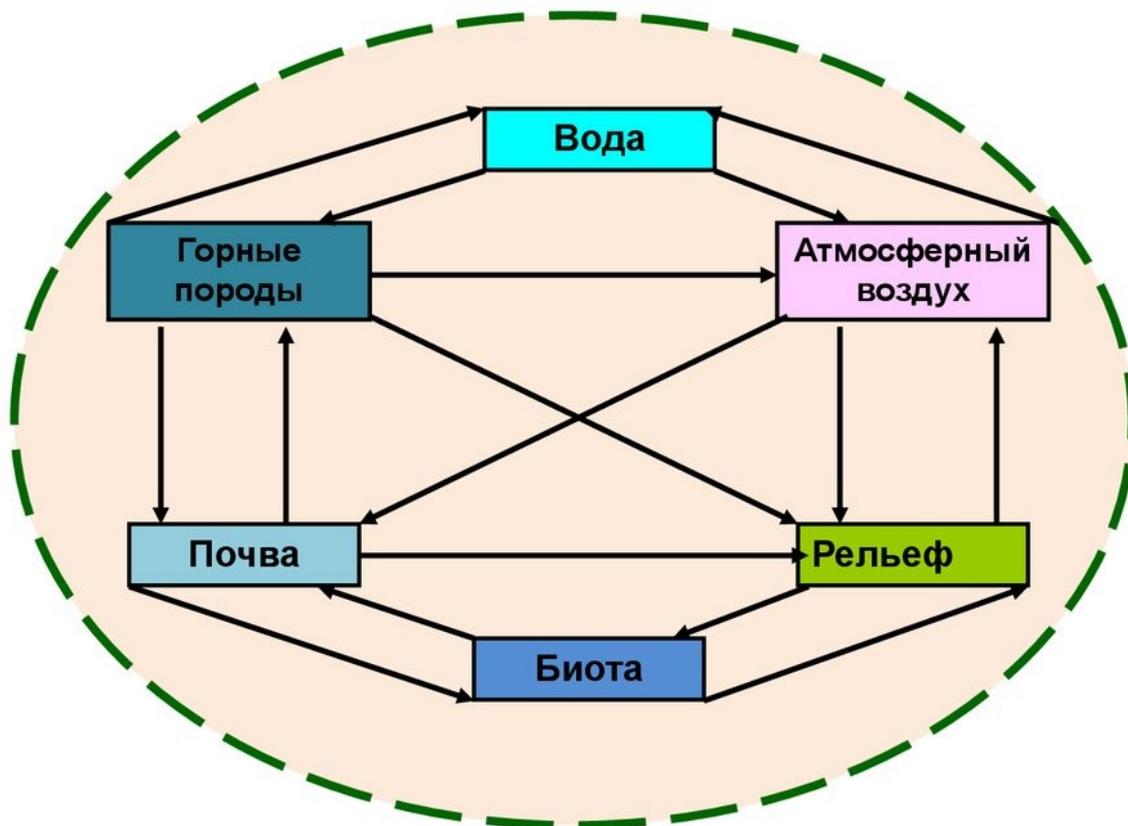


Рисунок – 1.9 Структура геосистемы

В результате деятельности человека возник совершенно новый вид геосистем природно-антропогенный, который существует в тесном взаимодействии природы и техники.

Иерархия геосистем представлена на региональном уровне - ландшафтными зонами, странами, областями, провинциями и округами, ландшафтами, а на локальном - местностями, урочищами и фациями.

Ландшафт определяется как большая и сложная неравновесная динамическая система земной поверхности, в которой осуществляется взаимодействие и взаимопроникновение элементов литосферы, гидросферы и атмосферы. Большинство ландшафтов являются биокосными системами, в которых неорганическая материя и живые организмы проникают друг в друга. Ландшафт выполняет несколько социально-экономических функций, то есть на нем располагаются земли разного назначения. Сейчас стоит задача создания культурных ландшафтов, что предполагает рациональное использование, а также их охрану от загрязнения.

Сельскохозяйственные ландшафты, расположенные на торфяных залежах и используемые в растениеводческих и животноводческих целях, общая площадь которых в России составляет 320 млн га, из них 130 млн га имеют слой торфа более 30 см, что делает их пригодными для выращивания сельскохозяйственных культур. В растениеводстве – это созданные человеком биогеоценозы (поля, сады, виноградники, чайные и ягодные плантации, сады-огороды и т. д.). В животноводстве – это пастбищные и ферменные биогеоценозы: пастбища (естественные и искусственные), сенокосы, фермы (помещения и прилегающая территория, выгоны, зоны утилизации отходов) [41].

В этих ландшафтах преобладает техногенная миграция элементов. Продолжает существовать биологический круговорот химических элементов, имеющих большую роль.

Сельскохозяйственные ландшафты делятся на агроландшафты: земледельческие и животноводческие (скотоводческие).

Земледельческие агроландшафты – это древние культурные ландшафты, созданные хозяйственной деятельностью человека. Характеризуются чередованием или сочетанием пахотных угодий (сельскохозяйственных полей, разделенных травяными или с кустарниковыми межами), огородов, садов, мелиоративных природно-хозяйственных систем, природных или ландшафтных комплексов и инженерных вспомогательных сооружений коммуникаций и селитебных комплексов.

Наиболее существенные изменения в земледельческих ландшафтах происходят в почвенном и растительном покрове. Естественная разнообразная растительность меняется на несколько видов агрокультур. Почвы разрыхляются, верхние почвенные горизонты перемешиваются в результате обработки.

Техногенная миграция в сельскохозяйственных ландшафтах характеризуется некоторыми особенностями:

1. Ежегодно с 1 га с урожаем выносятся 2000–52000 кг различных химических элементов;

2. В ландшафты техногенным путем в год вносится до 600 кг/га элементов в минеральной форме (азот, фосфор, калий, бор, марганец, молибден и медь);

3. Среди постоянно выносимых химических элементов преобладают биофильные (кислород, калий, азот, фосфор, калий, магний, кремний, сера и др.);

4. Верхний горизонт почв подвергается постоянному техногенно-механическому перемешиванию.

Как следствие этого, наблюдается уменьшение естественного разнообразия растительности, а также разомкнутости биогеохимического круговорота агроландшафтов, связанных с выносом элементов с урожаем. Резко обедняется и меняется животное население. Снижается содержание гумуса в почве, что требует внесения органики.

Животноводческие агроландшафты являются первыми ландшафтами производящего типа. От различий организации и специфики хозяйственного использования выделяются: пастбищные, сенокосные и фермерские природно-антропогенные ландшафты. Значительное место принадлежит пастбищным ландшафтам. Они характеризуются заменой в ландшафтах естественных животных на одомашненных (в основном, травоядных). Умеренные нагрузки травоядных животных на пастбища увеличивают биопродуктивность угодий. При выпасе больших стад на одной территории (неумеренный выпас скота) нарушается не только растительный покров, но и верхние горизонты почвы.

В настоящее время выделяются три подтипа пастбищных ландшафтов:

1. Культурные пастбища, с сеянными, орошаемыми и удобряемыми лугами. На них по определенной схеме выпасается скот, заготавливается сено и «зеленая масса»;

2. Естественные пастбища могут чередоваться с сеянными лугами и сенокосами;

3. Отгонно-пастбищные ландшафты кочевого животноводства, развитого в аридных, северных зонах.

Промышленные ландшафты характеризуются существенными и разнообразными изменениями практически во всех природных компонентах геосистем. По особенностям миграции элементов промышленные ландшафты отличаются от биогенных. Из таких ландшафтов основная часть элементов удаляется в форме самостоятельных минеральных видов или в форме техногенных соединений. Они часто не имеют природных аналогов. В эти ландшафты вносятся новые элементы за счет потерь сырья и производственных отходов. Промышленные ландшафты являются также источниками различных соединений, вносимых в соседние ландшафты. Эти поступления обычно представляют собой вещества, загрязняющие окружающую среду. В зависимости от профиля производства промышленные ландшафты будут отличаться друг от друга по комплексу элементов-загрязнителей. Морфология природных ландшафтов значительно меняется в процессе строительства и функционирования промышленных объектов, что также связано с вырубкой леса, преобразованием мезорельефа и геологического строения геосистем на уровне местности и урочищ, созданием или уничтожением водных объектов, планированием, застройкой, изъятием из ландшафта ресурсов и загрязнением территории. В результате изменяются морфологические характеристики и гидрологический режим ландшафта.

Ландшафты населенных пунктов, селитебные, обладают целым рядом присущих им особенностей, которые влияют на ход миграции элементов в них и отличаются от окружающих ландшафтов повышенным загрязнением грунтовых вод. Города и их промышленно-транспортные системы занимают примерно 4 % площади суши, однако они формируют большие площади теплового, химического, шумового и радиоактивного загрязнения. Приземная атмосфера селитебных ландшафтов содержит повышенное количество угарного газа, соединений серы, азота, аэрозолей и взвешенных частиц.

Структурной составляющей ландшафта являются элементарные ландшафты, которые объединяет миграция элементов. Миграция делится на: механическую, физико-химическую, биогенную, коллоидную, миграцию газов. Существует так же техногенная миграция, которая связана с общественным

процессом.

Интенсивность миграции иногда резко уменьшается на коротком расстоянии, что приводит к значительной концентрации мигрирующих элементов. Такие участки называются **геохимическими барьерами** [115]. Выделяют два основных типа барьеров – природные и техногенные. В свою очередь данные типы разделяются на классы по видам преобладающей в каждом конкретном случае миграции. В качестве геохимических барьеров можно привести растительный, почвенный покров и подстилающие грунты, которые в определенных случаях, например, при утилизации сточных вод на сельскохозяйственных полях, являются главными.

Самым действенным барьером на пути миграции азотных соединений является растительный покров, так как многолетние растения способны усваивать большое количество азота (в частности нитратов): многолетние травы могут усвоить от 200 до 600 кг чистого азота на одном гектаре посевов в год в зависимости от климатической зоны. При передозировке азота качество урожая может быть неудовлетворительным, тогда скошенные травы можно использовать на приготовление компостов для удобрения других полей. Выращивание культур, используемых непосредственно в пищу, при утилизации сточных вод не рекомендуется во избежание угрозы здоровью человека (рисунок 1.10).

Следующим геохимическим барьером для азота является почвенный покров. Почва, являясь, по определению В. В. Докучаева, наружной оболочкой суши, одной из первых подвергается загрязнению и аккумулируется в себе большой объем поступающих веществ. Почва, как активно действующее органоминеральное тело, способна значительно трансформировать загрязняющие вещества вплоть до их разрушения.

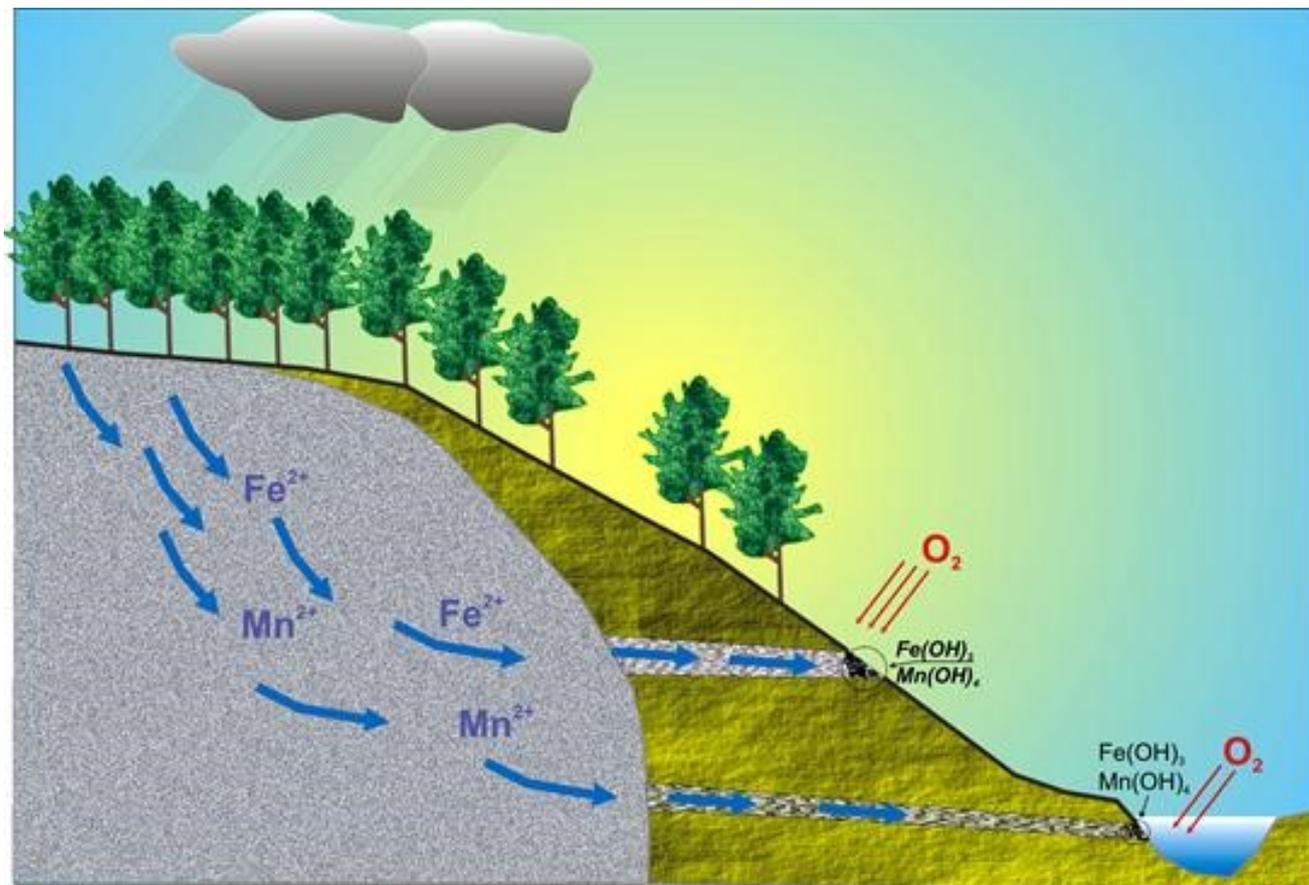


Рисунок – 1.10 Геохимические почвенные барьеры.

Подстилающий почву слой слабоводонасыщенных грунтов выступает в качестве барьера для азотных соединений: для аммония – как сорбционный барьер, а для нитратов – как гидрофизический барьер, замедляющий вертикальные потоки влаги.

Для описания загрязнения необходимо учитывать различные механизмы поступления загрязняющих веществ такие как: с атмосферными осадками, поливной водой, при обработке химикатами и другие.

Гидрохимические компоненты являются наиболее подвижными и информативными показателями процессов обмена веществ, они составляют основную массу мигрирующих элементов в геосистемах.

Утилизация сточных вод животноводческих комплексов, которые по данным [123] в 1 м³ содержат 0,8 – 1,4 кг азота, 0,3 – 0,7 кг фосфора, 0,4 – 1,2 кг калия, причём 50 – 70% азота находится в легкодоступной для растений форме и хорошо усваивается ими, создаёт мощную предпосылку для загрязнения окружающей среды. Минеральная часть азота в стоках содержится в основном в виде аммония, нитратов по сравнению с ним мало, но в процессе

нитрификации аммоний трансформируется в нитраты, которые обладают большой подвижностью и не сорбируются почвой. Азот белковых нерастворимых соединений используется растениями постепенно по мере их минерализации. Фосфор представлен в виде органических соединений, поэтому в почве он также постепенно высвобождается в процессе минерализации и используется растениями. Калий в стоках находится в растворённом виде и доступен для растений. В почве он закрепляется в результате адсорбции и хорошо сохраняется при её высокой поглотительной способности.

Для предотвращения загрязнений одной из необходимых мер является осуществление мониторинга за состоянием окружающей среды. Эта мера повышает экологическую безопасность функционирования объектов сельскохозяйственного, назначения и позволяет своевременно и правильно предотвращать или минимизировать загрязнения с одной стороны, а с другой разрабатывать оптимальные стратегии утилизации отходов.

1.4. Экологические аспекты утилизации сточных вод животноводческих комплексов

В монографии рассмотрены вопросы, связанные с проблемой утилизации сточных вод животноводческих комплексов и их влияние на окружающую среду, так как они являются наиболее интенсивными загрязнителями по сравнению к другим стокам и обладают высокой удобрительной ценностью, тем самым представляя наибольший интерес для сельского хозяйства.

Сточные воды обычно делятся на:

- хозяйственно-бытовые;
- промышленные;
- животноводческие;

Под хозяйственно-бытовыми сточными водами понимаются стоки, поступающие из городской и поселковой канализации или поступающие с крупных коммунальных объектов, а также обрабатываемые на городских очистных сооружениях. В городскую (поселковую) канализационную сеть поступают стоки от жилых зданий, учреждений, учебных заведений, а также

воды от поливки улиц и инфильтрационные, ливневые стоки могут отводиться отдельной ливневой канализацией.

Хозяйственно-бытовые сточные воды классифицируются как имеющие низкую удобрительную ценность, а также низкую концентрацию растворенных веществ (не более 1 г/л), нейтральную или слабощелочную реакцию среды, небольшое содержание органического вещества, бикарбонатно - хлоридный состав, низкий агрономелиоративный потенциал (таблица 1.1) [123,131,158].

Промышленные сточные воды или производственные представляют собой стоки от всевозможных предприятий пищевой, легкой, лесной, рыбной и прочие промышленности, а также пунктов первичной переработки плодов и овощей. По удобрительной ценности они весьма различны (таблица 1.1).

Сточные воды текстильной промышленности характеризуются слабощелочной и щелочной реакцией, невысокой концентрацией растворенных веществ, наличием карбонатов и бикарбонатов, красителей и детергентов, малым содержанием органических веществ, значительным количеством солей натрия. Удобрительная ценность невысокая, агрономелиоративный потенциал низкий.

Сточные воды химической и химико - фармацевтической промышленности отличаются крайне большим разнообразием по всем агрономелиоративным показателям. Как правило, им свойственна высокая концентрация растворенных минеральных и органических веществ (> 8 г/л), большое содержание сульфатов и хлоридов натрия. В этом виде сточных вод соотношение солей кальция и натрия неблагоприятное. Содержание хлора превышает 1000 мг/л. Удобрительная ценность определяется как высокая, но обычно односторонняя – большое содержание азота, мало калия и фосфора.

Сточные воды пищевой промышленности содержат большое количество взвешенного осадка и обладают слабокислой реакцией. Реакция среды в результате подготовки и хранения сточных вод подвержена большому изменению. Стоки имеют повышенное содержание органических веществ, но в отличие от стоков химической промышленности не токсичны, поскольку имеют естественное происхождение. Удобрительная ценность средняя и

высокая, при использовании для орошения требуют подготовки.

Сточные воды гидролизных и биохимических заводов, работающих на отходах сельскохозяйственного производства, обладают кислой или слабо кислой реакцией среды, высоким содержанием органических веществ и, в целом, повышенной концентрацией растворённых веществ (≈ 4 г/л) и минерализацией (2,2 г/л). Для этого вида характерно высокое содержание сульфатов натрия и кальция. Удобрительная ценность высокая по азоту и калию, для орошения требуется подготовка, агрономелиоративный потенциал характеризуется как высокий.

Сточные воды мясомолочной промышленности имеют чаще кислую и слабокислую реакцию, повышенную концентрацию растворённых веществ (2,7-3,6 г/л). Для них свойственно повышенное содержание хлористого натрия, что обусловлено технологией производства. Исключением являются сточные воды молочных заводов, которые имеют благоприятный состав. Агрономелиоративный потенциал высокий, для условий регулярного орошения требуется подготовка.

Сточные воды предприятий химической промышленности, производства минеральных удобрений обычно смешиваются с городскими сточными водами в большом соотношении и совместно проходят очистку на сооружениях искусственно - биологической очистки, и поэтому характеризуются низкой удобрительной ценностью. Они содержат небольшие количества минеральных и органических веществ. Агрономелиоративный потенциал характеризуется как низкий. Сточные воды отдельных цехов этих предприятий, например, производства сложных удобрений, обладают высокой удобрительной ценностью.

Сточные воды консервных заводов и пунктов первичной переработки овощей и плодов характеризуются слабокислой или нейтральной реакцией, невысокой концентрацией растворённых солей (меньше 1 г/л), бикарбонатным составом. В составе солей преобладают соли натрия, удобрительная ценность которых невысокая. Агрономелиоративный потенциал невысокий, при использовании на орошении не требуют существенной подготовки.

Сточные воды заводов тяжёлого машиностроения и

нефтеперерабатывающих заводов не имеют существенных отличий от многих видов сточных вод. Им свойственна нейтральная или слабо щелочная реакция среды, невысокая концентрация растворённых веществ и низкий агроулучшающий потенциал [33,50,123].

Максимальные концентрации микроэлементов определены в ГОСТе 17. 4. 05-86 «Требования к сточным водам и их осадкам для орошения и удобрения» (таблица 1.3). Степень минерализации по А.Н. Костякову не должна превышать 400 мг/л [50,51,131].

Особенность орошения сточными водами заключается в том, что она проводится во всех почвенно-климатических зонах, за исключением дальнего севера, и используются разные технологические схемы. В связи с этим различаются и требования к составу сточных вод. Например, для регулярного орошения стоки должны быть менее концентрированными, чем для удобрительного орошения и удобрительных поливов.

Пригодность сточных вод для регулярного орошения определяется в каждом конкретном случае и зависит от различных почвенно-климатических и гидрогеологических условий (таблица 1.2) [123].

В связи с переводом животноводства на бесподстилочное содержание животных и птицы с применением систем гидросмыва в большом объёме появились животноводческие стоки (рисунки 1.11, 1.12).



Рисунок – 1.11 Бесподстилочное содержание птицы.



Рисунок – 1.12 Бесподстилочное содержание животных.

Считается, что навоз влажностью до 90 % является полужидким, более 95 % – жидким, а свыше 95 % – навозные сточные воды [29,147]. Так же к животноводческим стокам относится жидкая фракция, получаемая после разделения животноводческих стоков.

Бесподстилочный навоз содержит в себе протеина 12,8 %; клетчатки 19,8%; жира 2,6 %; общего азота 3,2 %; фосфора 0,07 %, а также большое количество минеральных веществ и микроэлементов, имеет слабощелочную реакцию, причем более 50 % азота содержится в легко растворимой аммиачной форме [147]. Состав животноводческих стоков зависит от способа содержания животных, поголовья, возраста и вида, рационов кормления и других условий. Уменьшение концентратов в рационе животных приводит к снижению содержания азота и фосфора и увеличению калия. Химический состав жидкого навоза, навозных стоков и животноводческих стоков зависит во многом от степени разбавления водой, но несмотря на большое разбавление водой, стоки обладают высокими удобрительными свойствами.

Животноводческие стоки считаются наиболее интенсивными загрязнителями, чем коммунально-бытовые и промышленные сточные воды. Однако они обладают высокой удобрительной ценностью. В своём изначальном виде животноводческие стоки не пригодны для внесения на поле в

качестве органического удобрения. Они содержат в своём составе крупные остатки корма, предметы ветеринарной обработки и другие твёрдые включения, которые засоряют и приводят в негодность трубопроводы, управляющую арматуру и другие технические элементы, могут содержать патогенные микроорганизмы (рисунок 1.13). Поэтому они требуют предварительной подготовки, которая может включать в себя: разделение на твёрдую и жидкую фракции, дезодорацию, обеззараживание, отделение твёрдых включений, измельчение остатков корма, гомогенизацию и другие операции.



Рисунок – 1.13 Состав животноводческих стоков.

Таблица – 1.1 Химический состав и агроメリоративный потенциал сточных вод [124].

№ п/п	Сточные воды	рН	взв. осад.	Сух остаток	прок остаток	щел.	Сl	SO ₄	Ca	Mq	Na	K	N ₀₆	NH ₄	P ₂ O ₅	XПК	Хар-ка агроメリ потенциал
		—	мг\л														
1	Хозяйственно-бытовые городов и посёлков	7,4	201	875	547	6,4	138	145	85	37	117	13	34	23	6,5	363	низкий
2	Предприятия текстильной промышленности.	8,4	224	905	502	4,6	130	224	49	25	205	23	27	—	6,0	384	низкий
3	Пред. химической и химико-фармацевтич. промышленности	7,9	700	8521	6551	5,0	1271	2316	373	30	1302	32	147	57	5,0	2741	средний и высокий
4	Предприятия пищевой промышленности: сахарные заводы	7,1	12977	2115	970	16,0	91	202	297	79	164	96	70	15	14	1752	средний и высокий
5	Крахмальных и крахмально-паточных заводов	5,0	2974	2192	1121	9,1	74	253	131	90	194	96	98	30	36	4128	средний и высокий
6	Спиртовых заводов (на картофеле и зерне)	7,2	—	550	—	42	135	след	81	7	125	15	42	—	—	—	средний и высокий
7	Мясомолочной промышленности.: молочных заводов	6,2	321	1235	936	13,5	134	98	88	42	65	51	78	57	32	1224	средний
8	Маслосырзаводов	7,2	387	2707	1822	21,0	218	123	194	98	105	67	105	67	120	1505	средний и высокий
9	Маслозаводов	5,4	1970	2722	1451	13,7	424	163	286	95	282	83	115	52	18	1985	средний и высокий
10	Мясокомбинатов	8,0	800	3600	2200	—	441	46	20	10	297	99	980	213	13	1442	средний и высокий
11	Пред. гидролизной пром. (гидролиз. И биохимические)	5,4	6246	3548	2131	7,3	216	1379	311	68	127	134	258	204	52	2290	высокий

продолжение таблицы 1.1.

№ п/п	Сточные воды	рН	взв. осад.	Сух остаток	прок остаток	щел.	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	N _{об}	NH ₄	P ₂ O ₅	XПК	Хар-ка агро-мел потенциала
		—	МГ\Л														
12	Завод белково-витаминных концент.	7,1	573	1740	1244	1,8	570	164	58	25	148	70	191	158	37	578	высокий
13	Общий сток заводов произ-ва минер. удобр.	7,7	292	956	760	3,0	116	216	90	45	113	17	25	12	5	146	средний и высокий
14	Цех сложных удобрений комбин. произв. удобрений.	8,6	221	776	342	8,2	47	126	55	16	30	7	147	—	38	537	средний и высокий
15	Консервного завода	7,3	198	964	734	6,7	37	112	44	39	104	18	17	9	4	332	низкий
16	Пунктов по первич. переработке плодов и овощей.	6,6	178	862	697	17,3	146	129	136	108	64	63	56	—	след	567	низкий
17	Нефтеперерабатывающих заводов.	7,8	64	1240	857	4,4	450	99	96	—	200	6	27	9	нет	421	низкий
18	Заводов тяжёлого машиностроения.	7,0	147	843	406	4,4	112	127	57	24	70	14	29	21	3	154	низкий
19	Животноводческие стоки свинокомплексов	7,5	1347	1636	—	54,4	160	38	178	71	77	274	617	573	152	966	высокий
20	Жив. стоки комплексов КРС.	7,4	—	7350	4600	59,1	980	100	502	288	2775	860	780	420	158	7290	высокий
21	Смешанные сточные воды.	7,0	4280	3870	2560	25,2	300	410	390	280	320	200	310	170	110	2350	высокий

Примечание. В таблице приведены средние данные химического состава сточных вод.

Таблица – 1.2 Требования к составу сточных вод по агрометрическим показателям при использовании их для орошения различных почв для условий регулярного орошения и удобрительного орошения.

№ п/п	Показатели	Ед. изм.	Почвы					
			дерново-подзолистые	торфяно-глеевые (осуш.)	серые	чернозёмы	каштановые	серозёмы
1	рН (реакция среды)	мг\л	6,0—8,5	6,0—8,0	6,0—7,5	6,0—7,5	6,0—7,5	5,5—7,5
2	Концентрация растворенных веществ (сухой остаток)	мг\л	до 4,5	до 3,5	до 3,5	до 2,5	до 2,0	до 1,5
3	Концентрация минеральных солей (прокалённый остаток)	мг\л	до 3,0	до 2,5	до 2,5	до 1,5	до 1,2	до 1,0
4	Натрий (Na)	мг\л	до 500	до 400	до 450	до 300	до 250	до 250
5	Кальций (Ca)	мг\л	до 750	до 650	до 650	до 500	до 450	до 350
6	Калий (K)	мг\л	до 150	до 150	до 125	до 100	до 75	до 75
7	Хлориды (Cl)	мг\л	до 500	до 400	до 400	до 350	до 300	до 250
8	Сульфаты (SO ₄)	мг\л	до 550	до 450	до 500	до 400	до 350	до 200
9	Щёлочность (HCO ₃)	мг экв\л	до 30	до 26	до 27	до 21	до 19	до 16
10	Азот общий (N)	мг\л	до 200	до 200	до 200	до 150	до 150	до 100
11	Азот аммиачный (NH ₄)	мг\л	до 150	до 100	до 150	до 100	до 100	до 100
12	Фосфор (P ₂ O ₅)	мг\л	до 100	до 75	до 75	до 75	до 75	до 75
13	Взвешенные вещества	мг\л	до 3000	до 3000	до 3000	до 3000	до 3000	до 3000
14	Бихроматная окисляемость (ХПК)	мгО\л	до 1750	до 1750	до 2000	не лимитируется в связи с глубоким залеганием грунтовых вод.		
15	Соотношение Ca : Na	мг\л	строго лимитируется			не выше 1 : 1		

Таблица – 1.3 Максимальные концентрации микроэлементов в сточных водах, используемых для орошения.

Микроэлементы	Концентрации мг/л
Барий	0,1
Бор	0,5
Бром	0,2
Ванадий	0,1
Висмут	0,1
Вольфрам	0,05
Кадмий	0,001
Кобальт	1
Марганец	10
Медь	0,1
Молибден	0,25
Мышьяк	0,05
Никель	0,1
Ртуть	0,0005
Свинец	0,03
Селен	0,001
Стронций	0,7
Сурьма	0,1
Теллур	0,01
Титан	0,1
Фтор	1,5
Хром	0,5
Цинк	1

Существует несколько разновидностей подпочвенного орошения. Это подпочвенное орошение при подаче стоков по трубопроводам к оросительной сети (рисунок 1.14), и доставка к сети с помощью мобильных цистерн (рисунок 1.15). При работе систем с подачей по трубопроводам, чистую воду и осветленные стоки подают в смеситель, далее через подводящую и распределительную сети - в увлажнитель, а из них через стыки труб - в почву [46].



Рисунок – 1.14 Подпочвенное орошение при подаче стоков по трубопроводам к оросительной сети.



Рисунок – 1.15 Стационарная оросительная система/

Суть технологии внутрпочвенного орошения с доставкой навозных стоков заключается в том, что они от прифермского навозохранилища к месту

внесения транспортируются мобильными цистернами. Технология состоит из следующих операций:

- загрузка мобильной цистерны из прифермского навозохранилища;
- транспортировка в поле; подключение к стыковочному устройству установки;
- внесение стоков в почву.

Недостатком данного способа (по сравнению с дождеванием) является низкая производительность машин и высокие затраты по времени.

Внутрипочвенное внесение животноводческих стоков в почву или шлицевание (рисунок 1.16). При этой технологии диск-нож или стрелчатая лапа культиватора прорезают дернину и почву, образуя разрез-шлиццу. Одновременно через спусковую трубу, которая расположена на консоли или лемехе, в шлиццу вводят жидкий навоз.



Рисунок – 1.16 Внутрипочвенное внесение животноводческих стоков, шлицевание.

В исследовательском центре в Мюхенберге разработана технология комбинированного мобильного гидромеханического внесения жидкого навоза (распространенного в Восточных землях Германии) шланговыми дождевальными машинами SBM с просветом шланга 75-90 мм и длиной 260-280 м, или просветом 110-125 мм. Сущность технологии заключается в комбинации способов мобильного транспортирования жидкого навоза с ферм к краю поля и гидромеханического распределения по полю дождевальной

рукавной машиной SBM [83, 126].

Вывоз на поля твёрдой фракции осуществляется по двум основным технологическим схемам. Прямоточная технология заключается в прямом вывозе на поле твёрдой фракции и распределением. Применяется при небольших объёмах и малых расстояниях. Перевалочная технология состоит в вывозе на поле и укладкой в бурты, из которых распределение по полю осуществляется в оптимальные для внесения сроки [134].

1.5. Технология подготовки животноводческих стоков

Как уже отмечалось, животноводческие стоки в своём первоначальном виде не пригодны для применения в качестве органического удобрения, и требуют предварительной обработки или подготовки, которые зависят от способа утилизации стоков.

Существуют различные технологии подготовки сточных вод. Наиболее распространёнными являются:

1. Разделение на твёрдую и жидкую фракции с обеззараживанием и дезодорацией;
2. Обеззараживание и гомогенизация животноводческих стоков без разделения на фракции;
3. Искусственная биологическая очистка с возможной дальнейшей доочисткой на полях; обеззараживание в БОКс прудах; сушка (для птичьего помёта).

Технология обработки животноводческих стоков с разделением на твёрдую и жидкую фракцию обычно применяется перед использованием на орошение (рисунок 1.17), а также для уменьшения затрат на хранение.

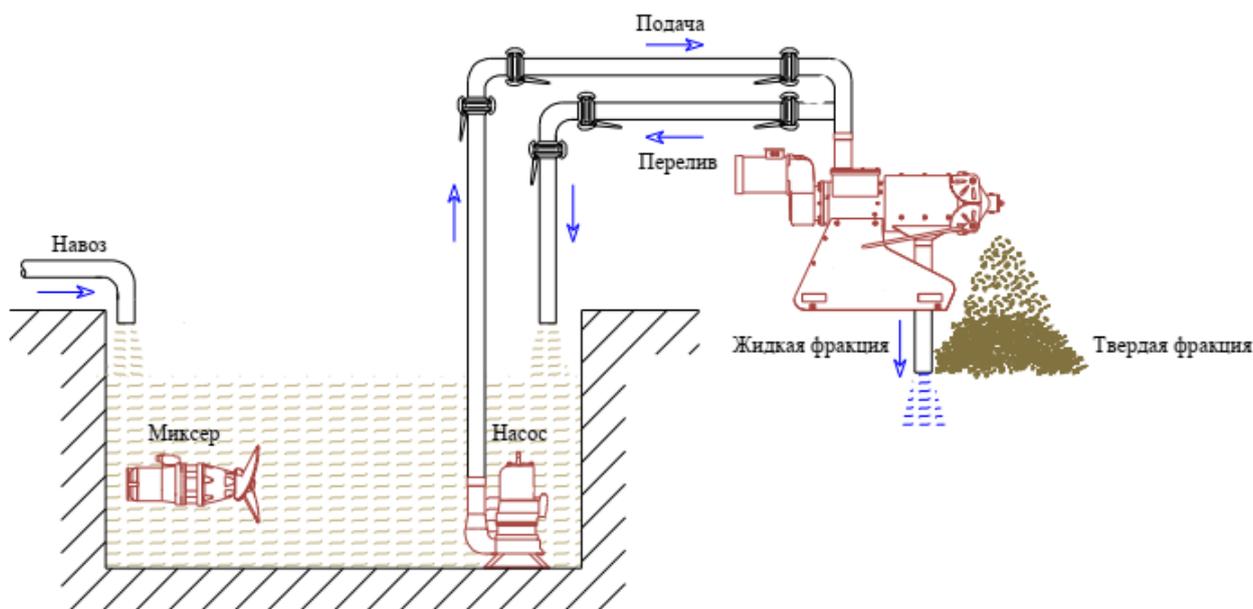


Рисунок – 1.17 Технология обработки животноводческих стоков с разделением на твёрдую и жидкую фракцию.

Стоки свиноводческих ферм и ферм КРС имеют различные физико-химические, реологические и седиментационные свойства и поэтому имеются различия в системе подготовки к использованию. Реологические свойства характеризуют динамическую вязкость, предельное напряжение сдвига, тиксотропность. Седиментационные свойства характеризуют способность к расслоению и образованию осадка при малых скоростях.

Для отделения крупных включений могут использоваться прутковые грохоты, цепные транспортёры и виброгрохоты. Операция измельчения (корнеплодов, остатков корма и других примесей) используется при внесении животноводческих стоков с помощью дождевальных установок. Для этого устанавливают ножевые насадки на входе в насос или применяют их на трубопроводе перед навозосборником [24, 29].

Технологическая схема разделения животноводческих стоков на фракции состоит из следующих операций: подача стоков в карантинную ёмкость → разделитель (отсюда твёрдая фракция поступает на транспортёр и складывается в бурты на специальные площадки, где происходит термическое обеззараживание самонагревом) → приёмная ёмкость для жидкой фракции → вертикальные отстойники (осадок из них направляется в бурты) →

прифермский накопитель. Технологическая схема может изменяться в зависимости от способов разделения животноводческих стоков, экологических и других условий.

Наиболее распространенным является механическое разделение на фракции, после которой в конечном твёрдом компоненте содержится 25 - 28 % сухого вещества, плотность 300 - 400 кг/м³ и хранится в виде насыпного конуса. При гидравлическом разделении сначала происходит грубое разделение, дальше твёрдую фракцию с влажностью 95 % периодически перекачивают или направляют в отстойник. Твёрдый компонент получают через 6 - 8 недель отстаивания. Он содержит 20 % сухого вещества, очень неустойчив, непрочно-связная влага выделяется из него при любом механическом воздействии, поэтому его невозможно транспортировать навозоразбрасывателями, так как он переходит в вязко-текучее состояние, и его компостируют, что требует больших затрат рабочего времени [23,29,134].

Искусственная биологическая очистка основана на том, что коллоидные и растворенные вещества разрушаются в процессе жизнедеятельности аэробных микроорганизмов. При очистке животноводческих стоков сначала проводят разделение на фракции, твёрдую фракцию складывают, а жидкую фракцию обрабатывают в аэротенках или на биофильтрах (аэробная обработка). После аэротенки смесь жидкой фракции с хлопьями активного ила подаётся в отстойник, где очищенная жидкая фракция отделяется от активного ила и далее подаётся в накопитель [82, 89, 90].

Технологическая схема приготовления гомогенизированного навоза состоит из: комплекс → карантинное хранилище → основное хранилище с гомогенизирующей установкой → поле. Навоз вносится с помощью цистерн разбрасывателей или дождевальных установок после разбавления водой. Существует два вида гомогенизации: 1) однократное перемешивание перед внесением, 2) перемешивание до гомогенизированного состояния через определённые промежутки времени. При внесении мобильными цистернами разбрасывателями (рисунок 1.18) достаточно однократного перемешивания.



Рисунок – 1.18 Мобильные цистерны разбрасыватели.

Для предупреждения уплотнения осадка перемешивание проводят ежедневно в течение 2 - 3 часов в сутки. Во время разгрузки ёмкостей перемешивание начинают за 2 - 3 часа до неё и продолжают до конца разгрузки. Наиболее интенсивно расслаиванию подвержен свиной навоз, поэтому его перед каждой гидромеханической транспортировкой необходимо гомогенизировать. Для гомогенизации применяют различные виды механических, гидравлических и пневматических устройств [90, 134].

В выше перечисленных технологиях ёмкость накопителей определяют исходя из суточных норм выхода стоков, а также периодов, в течение которых их нельзя вносить, холодный период или вспышки эпизоотий. Обычно это длится 3 - 8 месяцев.

При хранении жидкой фракции в накопителях наблюдается потеря азота, которая через 35 суток составляет от 15 до 29 % [29]. По месту расположения накопители делятся: на прифермские и полевые. Для предотвращения загрязнения окружающей среды накопители должны иметь гидроизоляцию.

Для очистки стоков так же используются биологические пруды. Они бывают двух типов, окислительные (аэробные) (рисунок 1.19) и восстановительные (анаэробные) (рисунок 1.20). Процесс очистки в

биологических прудах связан с жизнедеятельностью растений и животного планктона. Пруды разделяются на проточные (одиочные или в комплексе), контактные (заполняются и освобождаются периодически), накопители (принимают очищенную воду и регулируют суточную неравномерность) [89].

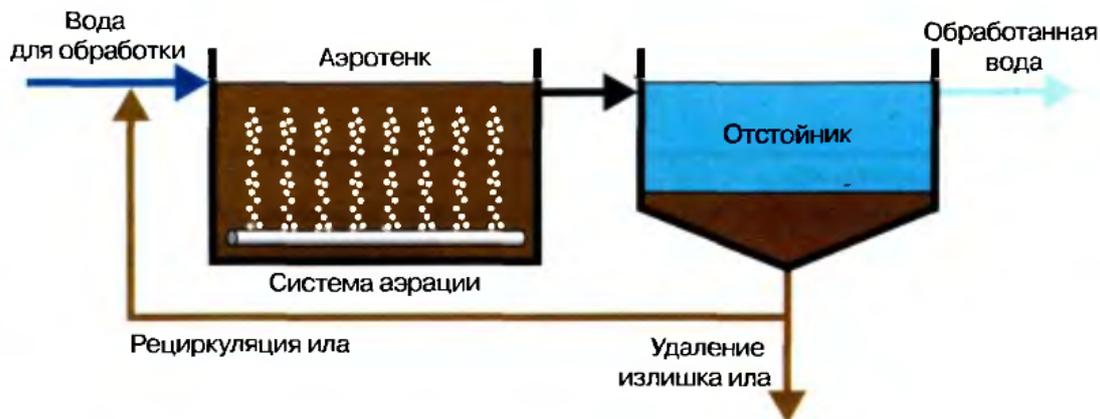


Рисунок – 1.19 Схема окислительных (аэробных) биологических прудов.

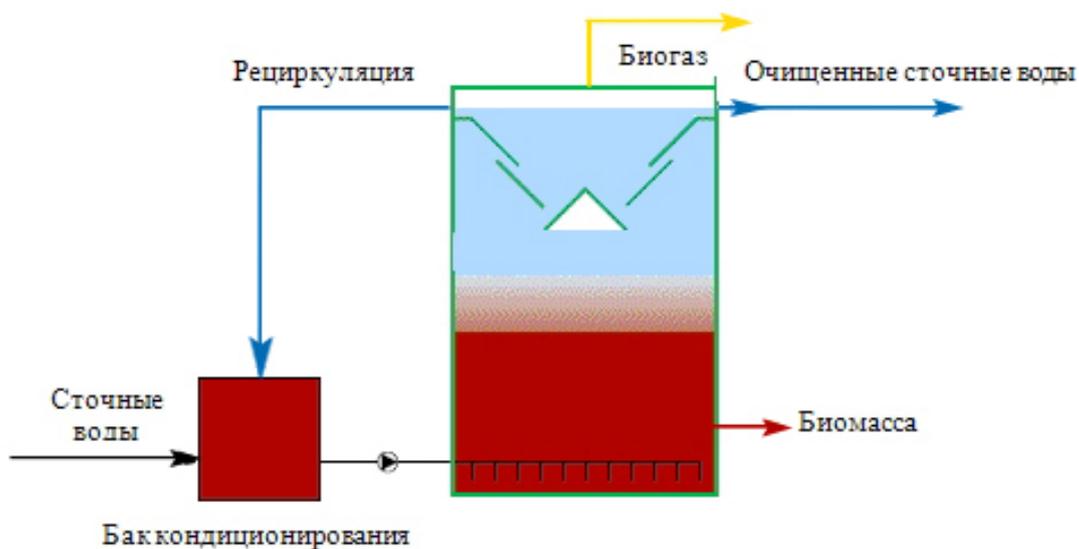


Рисунок – 1.20 Схема восстановительных (анаэробных) биологических прудов.

В качестве сооружений доочистки пруды используются в 59 %, как самостоятельные сооружения в 29,5 %, в качестве доочистки после механической очистки в 11,5 %. Считается, что в воде биологических прудов могут сохраняться вибрионы холеры, туберкулёза и вирусов полиомиелита. Эффективность очистки сточных вод от содержания в них вируса в стабилизационных прудах может колебаться от 88 до 99 %. Туберкулёз в обычных биологических прудах не погибает. Сейчас разработан новый тип

БОКс прудов. За счёт конструктивных особенностей и специальной закваски из микроводорослей в этих прудах, за 7 - 12 суток, в зависимости от климатической зоны, получают воду без вирусов [74, 137, 146]. БОКс пруды так же применяются для очистки и доочистки на птицефермах. Птичий помёт с естественной влажностью вывозится на площадку для приготовления компостов, а с влажностью более 90 % вывозиться на поля и также используется для приготовления компостов. Помёт с естественной влажностью используется и для промышленной сушки [116, 121].

Выводы

1. Анализ литературных работ и экспериментальных исследований ряда научно-исследовательских организаций по вопросу взаимодействия сточных вод животноводческих комплексов и компонентов геосистем, показал, что основным и наиболее активным загрязнителем почв, грунтов и грунтовых вод являются азотные соединения, представленные нитратами.

2. Применение теории геосистемного подхода к проблеме утилизации сточных вод животноводческих комплексов и рассмотрение составляющих окружающей среды в качестве геохимических барьеров на пути миграций загрязняющих веществ, позволяет рассматривать влияние техногенных воздействий на окружающую среду в целом, а не на отдельные её компоненты.

3. При утилизации сточных вод животноводческих комплексов на ирригационных полях орошения с выращиванием на них сельскохозяйственной продукции необходим подход с точки зрения максимальной безопасности утилизации стоков для окружающей среды, а не с позиции получения максимальных урожаев.

4. Для создания оптимальных условий функционирования земель, орошаемых сточными водами, исходя из условий максимально возможной экологической безопасности, необходимо составление долгосрочного прогноза развития экологической ситуации с учётом всех природных условий объекта, что представляется возможным с помощью математического моделирования. С этой целью разработана математическая модель передвижения минеральных азотных соединений и влаги в почве и подстилающих грунтах до уровня грунтовых вод, с учётом климатических условий и процессов отбора азотных соединений растениями, а также их трансформаций.

Глава 2. Моделирование совместного передвижения влаги и азотных соединений в почве и подстилающих грунтах

2.1. Формы содержания и превращения азота в почвах

Азот – бесцветный, безвкусный, не имеющий запаха газ. В элементарном состоянии состоит из двухатомных молекул N_2 . Атомы связаны между собой прочной тройной связью.

Азот в почвах содержится в органических и неорганических формах. Органический азот по Доммергенцу и Монгеноту [137] представлен: протеинами и пептидами 24-50%, в нуклеиновых кислотах 3-10%, в аминасахарах 5-10%, в неидентифицированных гумусовых веществах 50%. По Бриммеру 20-40% гидролизуемого азота находится в аминокислотах, 5-10% в гексоминах и не более 1% от общего азота поверхностных горизонтов почв в пуринах. Другие формы, такие как холин, креатин были выделены из почв, но их содержание мало. Что касается негидролизуемых форм органического азота то до конца их природа не выяснена [19, 21, 22].

Неорганический азот представлен в основном аммонием, нитратами и нитритами. Последние присутствуют в очень малых количествах или отсутствуют вовсе и, по литературным данным, не сорбируются почвой [28, 76].

Азотные кислоты при взаимодействии с металлами образуют хорошо растворимые в воде соли – нитраты. Так же соединением азота является аммиак NH_3 , который представляет собой бесцветный газ с удушливым, резким запахом и вкусом. При взаимодействии с водой аммиак образует гидроксид аммония $NH_4OH=2NH_3+H_2O$, а с угольной кислотой образует раствор углекислого аммония $(NH_4)_2CO_3=2NH_3+H_2CO_3$. Аммоний в почве может находиться в почвенном растворе в ионной форме NH_4^+ и составляет незначительную часть, а также в почвенно-поглощающем комплексе в обменно - и необменно - поглощенном состоянии, легко замещая ионы водорода, калия, частично кальция. Необменно - поглощенный аммоний содержится в трёх формах:

- 1) кристаллические соединения, образованные почвенным раствором;
- 2) аммоний в первичных силикатах (слюды, полевые шпаты в решётках которых он замещает калий);
- 3) аммоний между слоями кристаллической решётки вторичных минералов типа вермикулит, занимающего место калия [26].

Фиксированный глинистыми трёхслойными минералами, аммоний можно рассматривать как конечную форму поглощения NH_4 , а растворённый и обменно-поглощённый – как промежуточные формы. Процесс фиксации носит обратимый характер. Растения и микроорганизмы способствуют переводу аммония из фиксированного положения, благодаря извлечению ими NH_4^+ из почвенного раствора и обменно-поглощённого состояния, что влечёт за собой смещение реакции динамического равновесия $\text{NH}_4^+_{(\text{раствор})} \Leftrightarrow \text{NH}_4^+_{(\text{обменный})} \Leftrightarrow \text{NH}_4^+_{(\text{фиксированный})}$ [19, 110].

Часть аммония в почве подвергается нитрификационному процессу с помощью микроорганизмов (рисунок 2.1), который носит окислительный характер, и возможен в аэробных условиях. Оптимальная влажность 40-70 % от ППВ, температура почвы 25-30 °С, pH 7,5 - 6 [69, 70, 71, 72].



Рисунок – 2.1 Схема нитрификации аммония.

Сначала NH_4 окисляется до NO_2 который представляет собой неустойчивую форму, далее NO_2 переходит в NO_3 . Нитраты (NO_3) могут

образовывать легко растворимые с водой соли азотной кислоты, так же могут находиться в свободном состоянии в виде нитрат-иона в почвенном растворе, они не сорбируются почвой, как и NO_2 .

Денитрификация – процесс восстановления нитратного азота до газообразных форм (NO , N_2O , N_2). Процесс интенсивно протекает в анаэробных условиях, высокой влажности (ППВ > 70 %) и щелочной реакции среды (рисунок 2.2). В обычных условиях денитрификация идет менее интенсивно.



Рисунок – 2.2 Схема денитрификации нитратов.

Образование газообразных азотистых продуктов происходит не только при восстановлении нитратов денитрифицирующими микроорганизмами, но и в результате химических реакций с участием нитратов. Газообразные потери азота из почвы составляют 15 - 20%. Азотные соединения также усваиваются растениями. Наиболее эффективно усваивают азот многолетние травы.

С повышением плодородия почв доля нитратного азота увеличивается до 40 - 50 %. Большое влияние на содержание также оказывают возделываемые культуры. В зависимости от возделываемых культур соотношение $\text{N} - \text{NO}_3 : \text{N} - \text{NH}_4$ (обменный) составляет; пропашные 1: (0,1 - 0,04); зерновые 1: (0,1-0,15) и многолетние 1: 0,25 - 0,35 [19, 55, 56, 135].

Азот в растениях входит в состав белков, содержится в нуклеиновых кислотах (РНК, ДНК), играющих важную роль в обмене веществ; хлорофиле,

ферментах, и помимо них содержится в форме азотных соединений (нитратов, нитритов, аммиака). Избыточный нитратный азот способен накапливаться в растениях без вреда для них, но избыток его представляет угрозу для здоровья людей и животных.

Животноводческие стоки являются мощным источником поступления соединений азота в почву. В них содержится общего азота 3,2 % от общего объёма, причём более 50 % азота содержится в лёгкорастворимой аммиачной форме [139, 136]. При чрезмерном внесении стоков нитраты обладающие большой подвижностью, вымываются в подстилающие грунты с невысокой интенсивностью денитрификации и за пределы зоны корнеобитания, что создаёт угрозу загрязнения грунтовых вод. При высокой влажности процесс нитрификации замедляется, в этом случае происходит увеличение концентрации аммония в почвенном растворе, что создаёт возможность загрязнения грунтовых вод аммонием нисходящими потоками влаги.

2.2. Моделирование передвижения влаги в почве

В настоящее время можно выделить несколько подходов к изучению процессов переноса влаги в пористых средах – макроскопический, микроскопический, молекулярный.

- макроскопический основан на представлении всей системы в виде гомогенной или гетерогенной среды с макроскопическими характеристиками;

- микроскопический основан на детализации размеров и расположения частиц твёрдой фазы, с рассмотрением меж агрегатных и внутри агрегатных пор, то есть структуры пористой среды;

- молекулярный подход основан на рассмотрении дисперсной среды в виде молекул, ионов, атомов, а взаимодействия, происходящие между ними, подчиняются законам классической и квантовой механики.

Для модели был использован макроскопический подход, с рассмотрением каждого генетического горизонта почвы как гомогенного пористого пространства, иначе говоря, в явном виде не учитывалась структурность, а, следовательно, различие агрегатной и меж агрегатной пористости. Последнее

косвенным образом учитывается такими водно-физическими характеристиками, как капиллярная влагопроводность и взаимосвязь между влажностью и каркасно-капиллярным потенциалом, так называемая гидрофизическая характеристика почвы – ОГХ. Таким образом, макроскопический подход к рассмотрению пористого пространства является наиболее удобным по сравнению с другими, так как позволяет получать результаты с достаточной точностью, при его использовании требуется меньшее количество гидрофизических и гидрохимических параметров, возможность получения данных для расчётов экспериментальным путём.

Следует отметить, что имеющиеся попытки рассмотрения более сложных моделей пористого пространства, учитывающие крупные трещины, межагрегатные и внутри агрегатные поры, включая так называемые «тупиковые», заземление почвенного воздуха, но степень изученности таких подходов, экспериментальное их обеспечение параметрами не позволяют широко применять их для решения практических задач.

В большинстве случаев на полях орошения, которые используются для утилизации сточных вод животноводческих комплексов, возделываются многолетние травы, которые образуют сплошной растительный покров с практически однородной по горизонтали корневой массой. Для них можно рассматривать только вертикальные потоки влаги в почве. Правда, при использовании технологии полива по бороздам вблизи последних могут образовываться двумерные потоки, но ввиду их незначительности, это обстоятельство не приведет к существенным погрешностям.

В исследованиях за основу взяли математическую модель А.И. Голованова [38] многократно проверенную экспериментальным материалом и доработанную Евграфовым А.В.

На основе вышесказанного можно использовать закон Дарси, лежащий в основе теории движения жидкости в поровом пространстве, по которому объёмный вертикальный поток влаги через 1 м^2 поверхности равен:

$$q = -k \frac{\partial H}{\partial X}; \text{ м}^3_{\text{в}}/\text{м}^2/\text{сут} \quad (2.1)$$

где k – коэффициент влагопроводности, зависящий от влагонасыщенности, по А. И. Голованову [7]:

$$k = k_f \left(\frac{\omega - \omega_M}{m - \omega_M} \right)^5 \quad (2.2)$$

где k_f – коэффициент фильтрации, то есть влагопроводность при полном влагонасыщении, $\text{м}^3_{\text{в}}/\text{м}^2/\text{сут}$, здесь и далее $\text{м}^3_{\text{в}}$ – кубический метр почвенной влаги;

ω – объёмная влажность почвы, $\text{м}^3_{\text{в}}/\text{м}^3$;

ω_M – максимальная гигроскопичность, $\text{м}^3_{\text{в}}/\text{м}^3$;

m – влажность почвы при полном заполнении пор, численно равная пористости;

H – полный напор почвенной влаги, при отсчёте напоров от поверхности земли и оси x , направленной вниз:

$$H = -x + \psi, \text{ м} \quad (2.3)$$

где x – гравитационная составляющая напора;

ψ – напор, эквивалентный каркасно-капиллярному потенциалу, при неполном влагонасыщении $\psi < 0$. При высокой влажности превалирует капиллярный потенциал, приходящийся на единицу массы влаги, а при сильном иссушении малоподвижная влага находится под действием каркасного потенциала.

А. И. Голованов предложил в зоне полного влагонасыщения под ψ понимать гидростатическую составляющую полного напора, равную заглублению данной точки под уровень грунтовых вод: $\psi = x - h_{\text{г}}$, где $h_{\text{г}}$ – глубина грунтовых вод. При поливе затоплением, когда на поверхности почвы ($x = 0$) создаётся слой воды $h_{\text{с}}$, полный напор будет равен $H = h_{\text{с}}$.

Такая обобщённая трактовка ψ позволяет описывать передвижение влаги в большом слое, включающем в общем случае колеблющийся в нём уровень грунтовых вод, зоны полного и неполного влагонасыщения.

Для зоны неполного влагонасыщения нужно иметь зависимость между ω и ψ , которая может быть найдена из полевых экспериментов, например, при

одновременных измерениях влажности почвы и напора почвенной влаги с помощью танзиометров.

При изменении влажности в максимально широком диапазоне: от полного насыщения до максимальной гигроскопичности мы приняли эту зависимость в виде:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega - \omega_M}{m - \omega_M} = \exp \left[- \left(\frac{|\psi|}{\mu \cdot h_k} \right)^n \right] \quad (2.4)$$

где h_k – максимальная высота капиллярного поднятия, м;

μ и n – эмпирические коэффициенты, подбираемые так, чтобы наилучшим видом описать экспериментально определённую ОГХ.

Расходование почвенной влаги на испарение с поверхности почвы E_f и на транспирацию E_{TR} учитывалось следующим образом. Для каждой декады или иного промежутка времени применительно к конкретному году должно быть известно потенциальное суммарное испарение E_0 ; определяемое температурой и влажностью воздуха, с одной стороны, и биологическими особенностями конкретной фазы развития растения, с другой; при условии, что влажность почвы в корнеобитаемой зоне является оптимальной для растения, иными словами, при которой растение способно максимально транспирировать влагу. Суммарное потенциальное испарение в модели вычисляем по формуле:

$$E_0 = 0,0061 \cdot (t + 25)^2 \cdot (1 - a), \text{ мм/сут} \quad (2.5)$$

где t – температура воздуха за сутки в градусах Цельсия;

a – влажность воздуха за сутки в долях.

Температура и влажность воздуха берутся из многолетних метеонаблюдений. Это суммарное испарение подразделяется на:

$$E_f^{pot} = \alpha_e \cdot E_0 \text{ и } E_{TR}^{pot} = (1 - \alpha_e) E_0, \text{ м/сут} \quad (2.6)$$

где α_e – коэффициент, учитывающий долю расходования влаги на испарение с поверхности почвы от суммарного, при высокой влажности верхнего слоя почвы коррелирующий со степенью покрытия поверхности почвы листовой поверхностью, зависит от фазы развития растения и укосов

трав. В период вегетации он лежит в пределах 0,1...0,5, во вневегетационный период равен 1.

Иссушение верхнего слоя почвы учитывается так:

$$E_f = \varepsilon_\omega \cdot E_f^{pot} \quad (2.7)$$

где ε_ω – коэффициент редукции испарения, зависящий от влажности почв вблизи поверхности:

$$\varepsilon_\omega = 2 \cdot \bar{\omega} - \bar{\omega}^2; \quad \bar{\omega} = \frac{\omega - \omega_M}{0,8 \cdot m - \omega_M} : \text{при } \omega \geq 0,8 \cdot m \quad \varepsilon_\omega = 1; \text{ при } \omega \leq \omega_M \quad \varepsilon_\omega = 0$$

то есть принято, что заметное уменьшение испарения начинается при влажности почвы у поверхности равной 0,8 пористости.

Реальный расход влаги на транспирацию E_{TR} принят равным потенциальному при средней влажности корнеобитаемого слоя, превышающей нижний предел оптимального диапазона ω_{min} . В случае большего иссушения почв реальная транспирация уменьшается по зависимости:

$$E_{TR} = \varepsilon'_\omega \cdot E_{TR}^{pot} \quad (2.8)$$

$$\text{где } \varepsilon'_\omega = 2 \cdot \varpi_1 - \varpi_1^2; \quad \varpi_1 = \frac{\omega - B3}{\omega_{min} - B3}; \text{ при } \varpi_1 \geq 1 \quad \varepsilon'_\omega = 1; \text{ при } \varpi \leq 0 \quad \varepsilon'_\omega = 0$$

B3 - влажность завядания, равная примерно (1,3...1,5) ω_m .

Распределение интенсивности отбора влаги корнями растений в расчётном слое принимается также зависящей от влажности почвы в элементарных или расчётных слоях:

$$e_i = \frac{E_{TR} \cdot \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon_i \cdot h_i} \quad (2.9)$$

$$\text{где } \varepsilon_i = 2 \cdot \varpi_i - \varpi_i^2; \quad \varpi_i = \frac{\omega_i - B3}{m_i - B3}; \text{ при } \varpi < 0 \quad \varepsilon_i = 0$$

i – номер расчётного слоя;

n – число расчётных слоёв в корнеобитаемой зоне.

В этом случае отбор корнями из i - того слоя составит $e_i h_i$, [(м³_в/м³_п)сут], а

из всей корнеобитаемой зоны: $\sum_{i=1}^{i=n} e_i \cdot h_i = E_{TR}$. В модели предусмотрена

возможность изменения во времени мощности корнеобитаемого слоя.

Для численной реализации модели используем приведённый выше закон движения, а также уравнения баланса. С помощью конечно – разностного способа описания этого процесса можно получить систему алгебраических уравнений на каждый шаг по времени Δt . В связи с этим, минуя стадию вывода дифференциального уравнения, запишем систему алгебраических уравнений в конечных разностях, используя неявную схему.

С этой целью всю рассматриваемую толщу почвы и подстилающего грунта L разобьём на N слоёв переменной толщины h_i , опыт расчётов показывает, что толщину слоёв в корнеобитаемой зоне и вблизи неё желательно иметь равной 0,05м, глубже толщину слоёв можно постепенно увеличивать до 0,20...0,25м. Для облегчения учёта граничных условий на поверхности почвы и на нижней границе вводим слои нулевой толщины, то есть $h_1 = h_N = 0$. При этом вся толща представляется в виде блоков высотой h_i и площадью поперечного сечения 1м^2 . Каждый блок характеризуется влажностью в его центре ω_i , и соответствующим ей напором H_i . Такая схематизация представляется более очевидной по сравнению с узловой схемой. Поток влаги из i -того блока в $i+1$ -ый можно записать, используя понятие фильтрационного сопротивления:

$$q_i = \frac{H_i - H_{i+1}}{R_i} \quad (2.10)$$

При разной толщине блоков, разной их увлажнённости и разных водно – физических свойствах, так как соседние блоки могут принадлежать различным генетическим горизонтам, фильтрационное сопротивление R_i можно представить в виде двух последовательных сопротивлений R'_i и R''_i , первое из которых характеризует i -тый блок, а второе — $i+1$ блок:

$$R_i = R'_i + R''_i = 0,5 \left(\frac{h_i}{k_i} + \frac{h_{i+1}}{k_{i+1}} \right) \quad (2.11)$$

где k_i – коэффициент влагопроводности нижней половины i -го блока;

k_{i+1} – коэффициент влагопроводности верхней половины $i+1$ -того блока.

Эти коэффициенты рассчитываются по зависимости (2.2) с

использованием значений водно - физических свойств каждого блока k_{fi} , ω_{mi} , m_i . Если в зависимости (2.2) использовать значение влажности в центре соответствующего блока, то процесс будет описываться с большой степенью неточности, особенно при впитывании влаги в сухую почву, так как нижний сухой блок не пускает поток и необходимо значительное накопление влаги в верхнем блоке, чтобы преодолеть сопротивление нижнего блока.

Лучшие результаты даёт линейная аппроксимация эпюры влажности между центрами этих блоков. Тогда k_i подсчитывается по влажности:

$$\varpi_i = \omega_i + 0,5h_i \frac{\omega_i - \omega_i}{h_i + h_{i+1}} \quad (2.12)$$

а k_{i+1} – по влажности:

$$\varpi_{i+1} = \omega_i + (h_i + 0,5h_{i+1}) \frac{\omega_{i+1} - \omega_i}{h_i + h_{i+1}} \quad (2.13)$$

Запишем баланс влаги в i – том блоке за время Δt , который складывается из притока влаги из $i-1$ блока $q_{i-1}^{j+1}\Delta t$, оттока в $i+1$ блок $q_i^{j+1}\Delta t$, отбора влаги корнями растений $e_i^j h_i \Delta t$, и изменения запасов влаги в i – том блоке за это же время:

$$(\omega_i^{j+1} - \omega_i^j)h_i = (q_{i-1}^{j+1} - q_i^{j+1} - e_i^j h_i)\Delta t \quad (2.14)$$

где ω_i^j и ω_i^{j+1} – влажность почвы в i – том блоке на момент времени t и $t + \Delta t$ соответственно.

e_i^j – интенсивность отбора влаги корнями растений из i – того блока, определяемая значением E_{TR} и влажностью почвы на начало рассматриваемого шага по времени по выражению (2.9).

Перепишем уравнение (2.14) с учётом выражения (2.10) в виде:

$$\frac{\omega_i^{j+1} - \omega_i^j}{\Delta t} = \frac{H_{i-1}^{j+1} - H_i^{j+1}}{h_i R_{i-1}} - \frac{H_i^{j+1} - H_{i+1}^{j+1}}{h_i R_i} - e_i^j \quad (2.15)$$

Можно отметить, что в этом уравнении присутствуют две искомые величины ω_i^{j+1} и H_i^{j+1} , которые функционально связаны зависимостью (2.4).

Это уравнение предпочтительнее решать для напоров почвенной влаги, так как в данном случае легче определять потоки влаги, глубину грунтовых

вод, отток в дрены, а также потому, что на границе генетических горизонтов с разными свойствами возможен скачок влажности, но напоры всегда равны. Для этого запишем:

$$\omega_i^{j+1} = \omega_i^j + \frac{\omega_i^{j+1} - \omega_i^j}{H_i^{j+1} - H_i^j} (H_i^{j+1} - H_i^j) \quad (2.16)$$

При малых напорах:

$$\Delta t \frac{\omega_i^{j+1} - \omega_i^j}{H_i^{j+1} - H_i^j} \cong \sigma_i^{j+1/2} = \frac{\partial \omega}{\partial H} = \frac{\partial \omega}{\partial \psi} \quad (2.17)$$

где σ – коэффициент влагоёмкости, характеризующий изменение влажности почвы при небольшом изменении каркасно – капиллярного напора и определяется дифференцированием аппроксимации ОГХ. Для принятой нами зависимости (2.4):

$$\sigma = n \frac{m - \omega_M}{\mu^n h_k^n} \psi^{n-1} \exp \left[- \left(\frac{\psi}{\mu h_k} \right)^n \right] \quad (2.18)$$

или

$$\sigma = n \frac{\omega - \omega_M}{\mu h_k} \left[\ln(1/\varpi) \right]^{\frac{n-1}{n}} ; \varpi = \frac{\omega - \omega_M}{m - \omega_M} \quad (2.19)$$

При $n=1$

$$\sigma = \frac{(\omega - \omega_M)}{\mu h_k} \quad (2.20)$$

При $\psi > 0$ $\sigma = 0$.

В выражениях (2.18) – (2.20) значения μ , h_k и n принимаются для соответствующего генетического горизонта, а влажность почвы или каркасно-капиллярный напор берутся на момент времени $j + 1/2$, то есть $\omega_i = 0,5(\omega_i^j + \omega_i^{j+1})$ или $\psi_i = 0,5(\psi_i^j + \psi_i^{j+1})$, для этого применяется способ итераций и под ω_i^{j+1} или ψ_i^{j+1} понимаются значения искомых функций предыдущей итерации. Способ итераций позволяет упростить расчёт σ во всех итерациях, кроме первой и определяет его как $\sigma = \frac{\omega_i^{j+1} - \omega_i^j}{H_i^{j+1} - H_i^j}$.

Гидравлическое сопротивление R_{i-1} и R_i при итерациях также подсчитываются по средней влажности $\omega_i = 0,5(\omega_i^j + \omega_i^{j+1})$. С учётом (2.17)

преобразуем основное уравнение в виде:

$$\sigma_i^{j+1/2} \frac{H_i^{j+1} + H_i^j}{\Delta t} = \frac{H_{i-1}^{j+1} - H_i^{j+1}}{h_i R_{i-1}} - \frac{H_i^{j+1} - H_{i+1}^{j+1}}{h_i R_i} - e_i^j \quad (2.21)$$

Для решения методом прогонки преобразуем его:

$$\alpha_i H_{i+1}^{j+1} - \beta_i H_i^{j+1} + \gamma_i H = \delta_i \quad (2.22)$$

где $\alpha_i = 1/(h_i R_i)$; $\gamma_i = 1/R_{i-1}$; $\beta_i = \alpha_i + \gamma_i + \sigma_i^{j+1/2}/\Delta t$; $\delta_i = e_i^j - \sigma_i^{j+1} H_i^j / \Delta t$

При прямой прогонке определяем коэффициенты:

$$P_i = \frac{\alpha_i}{\beta_i - \gamma_i P_{i-1}} \quad \text{и} \quad Q_i = \frac{\gamma_i Q_{i-1} - \delta_i}{\beta_i - \gamma_i P_{i-1}} \quad (2.23)$$

а при обратной – искомые напоры:

$$H_i^{j+1} = P_i H_{i+1}^{j+1} + Q_i \quad (2.24)$$

С помощью ОГХ переводим напоры во влажность, итерации продолжаем до тех пор, пока в любом блоке влажность в двух соседних итерациях не будет отличаться более чем на 0,0001 объёма. При такой точности в пятиметровом слое ошибка влагозапасов не превысит 0,5 мм.

2.3. Начальные и граничные условия для моделирования влагопереноса

Граничные условия на поверхности почвы учитываются при подсчёте первых значений прогоночных коэффициентов P_1 и Q_1 . В межполивной период граничным условием является поток влаги равный испарению с поверхности почвы E_f :

$$E_f = - \frac{H_1^{j+1} - H_2^{j+1}}{R_1} \quad (1.24.1)$$

отсюда, имея в виду (2.24), находим:

$$P_1 = 1 ; \quad Q_1 = -E_f R_1 \quad (2.25)$$

В период поливов граничное условие на поверхности почвы в принципе зависит от способа полива. При сплошном затоплении слоем воды H_0 $H_1^{j+1} = H_0$, следовательно:

$$P_1 = 1 ; \quad Q_1 = H_0 \quad (2.26)$$

При поливе дождеванием заданной интенсивностью можно поток влаги

через поверхность почвы принимать равным этой интенсивности, но здесь неизбежны сложности с образованием слоя воды, поверхностного стока и т.п. При поливе по бороздам граничное условие ещё больше усложняется. Поэтому поливы моделировались следующим образом: полагаем, что в это время на всей площади влажность почвы у поверхности составляет 0,95...0,98 пористости, т.е. учитывалось наличие заземлённого воздуха. Этой влажности соответствует напор почвенной влаги H_0 , несколько меньший нуля, т.е. формально принимается условие (2.26).

Атмосферные осадки учитываются мгновенными, в день их выпадения увеличением влажности почвы в верхних слоях по простому алгоритму последовательного насыщения блоков до влажности $\omega_i = (1 - 0,2i)m_i$ до тех пор, пока в них не разместится суточное количество осадков. В последнем блоке влажность увеличивается на остаточное количество осадков после насыщения верхних блоков. При этом первый реальный блок ($i = 2$) насыщается до 0,96 от пористости, второй - до 0,94 и так далее. В начале этого шага по времени необходимо пересчитать напоры и уменьшить шаг по времени с последующим ростом до принятого. Так как осадки не содержат солей, то надо пересчитать концентрации, чтобы не нарушился баланс.

Приведённый алгоритм учёта атмосферных осадков даёт лучшие результаты по сравнению с учётом осадков в виде потока влаги. При учёте осадков в виде потока влаги обычно известно только суточное количество осадков, реальная интенсивность осадков, регистрируемая плувиографами, как правило, неизвестна. Поэтому достоверно судить об интенсивности осадков сложно. Задача усложняется и тем, что в структурную почву осадки проникают не только через поверхность, но и на некоторой глубине.

Данный алгоритм не учитывает возможность образования поверхностного стока, но на выровненных территориях часть не впитавшихся осадков, образующих лужи, затем впитывается.

Условия на нижней границе рассматриваемой толщи, то есть при $x=L$ обуславливаются гидрогеологической ситуацией. Так при глубоком залегании

грунтовых вод $h_r \gg L$ предполагается, что $\partial\omega/\partial x = 0$, а нисходящий поток влаги на этой глубине формирует такую влажность, при которой коэффициент влагопроводности станет равным этому потоку, так как градиент напора при этом будет равен единице, то есть $H_{N-1}^{j+1} - H_N^{j+1} = 0,5h_{N-1}$, напомним, что $h_N = 0$. Поэтому при обратной прогонке получаем:

$$H_N^{j+1} = \frac{Q_{N-1} - 0,5h_{N-1}}{1 - P_{N-1}} \quad (2.27)$$

и далее определяем напоры во всех остальных блоках по выражению (2.24).

Если грунтовые воды залегают неглубоко, обеспечено хорошее дренирование и их пополнение и поэтому можно считать, что их глубина постоянна, $h_r = \text{const}$, (что бывает редко), то:

$$H_N^{j+1} = -h_r \quad (2.28)$$

При этом вся расчётная толща должна включать всю зону аэрации, то есть $L = h_r$.

В случае, если грунтовые воды залегают не глубоко, степень естественной дренированности не велика, необходимо строительство дренажа и уровень грунтовых вод колеблется под воздействием поливов, то L необходимо принимать заведомо большим, чем наибольшая возможная глубина грунтовых вод. На нижней границе нужно задавать поток грунтовых вод D , складывающийся из влагообмена между зонами аэрации и полного насыщения, оттока в дрены D_d , фильтрационных потерь из оросительной сети f_k и возможного напорного подпитывания p_H , то есть учитывать баланс грунтовых вод. В этом случае отток в дрены будет равен:

$$D_d = D + f_k + p_H, \text{ м/сут.} \quad (2.29)$$

С другой стороны, отток в дрены равен:

$$D_d = D_0(h_d - h_r) \quad (2.30)$$

где D_0 – модуль дренажного стока при напоре над дренами равном 1 м; он находится из формул для расчёта дренажа. Так при глубоком залегании водоупора из формулы А. Н. Костякова следует, что:

$$D_0 = \frac{\pi k_f}{B(\ln B/d - 1)} \quad (2.31)$$

Из формулы В. М. Шестакова для расчёта дрен, уложенных в слоистых грунтах:

$$D_0 = \frac{8T}{B^2 + (1 + 8L_{HD}/B)} \quad (2.32)$$

где B — расстояние между дренами;

d — диаметр дрен;

h_d — глубина дрен;

k_f — коэффициент фильтрации водоносного горизонта;

T — суммарная водопроницаемость дренируемых слоёв;

L_{HD} — фильтрационное сопротивление, учитывающие работу несовершенных дрен в слоистых грунтах (по В. М. Шестакову) [87].

Можно использовать и другие аналогичные формулы.

Напорное подпитывание определяется по выражению:

$$p_H = \frac{k_0}{h_0} (h_p - h_T) \quad (2.33)$$

где k_0 и h_0 — коэффициент фильтрации и толщина отдельного слабопроницаемого слоя;

h_p — глубина залегания пьезометрической поверхности в нижнем напорном горизонте, если пьезометрическая поверхность выше поверхности земли, то $h_p < 0$;

f_k — средневегетационная или среднегодовая интенсивность питания грунтовых вод на массиве за счёт фильтрационных потерь из оросительной сети.

Можно записать в виде:

$$D = D_d - p_H - f_k = D_0(h_d - h_T) - \frac{k_0}{h_0}(h_p - h_T) - f_k \quad (2.33.1)$$

или:

$$D = \frac{H_{N-1}^{j+1} - H_N^{j+1}}{R_{N-1}} \quad (2.33.1)$$

а с учётом (2.24) получаем:

$$H_N^{j+1} = \frac{Q_{N-1} - DR_{N-1}}{1 - P_{N-1}} \quad (2.34)$$

Переменная во времени глубина грунтовых вод в этом варианте граничных условий вычисляется как $h_T = x$, $\psi = 0$. Следовательно, с учётом выражения (2.24) получаем:

$$H_N^{j+1} = \frac{Q_{N-1} - DR_{N-1}}{1 - P_{N-1}} \quad (2.35)$$

Начальным условием должна быть исходная эпюра влажности. В прогнозных расчётах она не известна. Так как расчёты начинаются с момента снеготаяния и полного оттаивания почвы, то возможно считать, что к данному моменту времени верхний слой почвы увлажнится примерно до предельной полевой влагоёмкости (ППВ), а ниже эпюра близка к равновесной, так как к началу весеннего увлажнения потоки влаги в нижних горизонтах к концу холодного периода затухают. Равновесную эпюру можно рассчитать по выражению (2.4), полагая, что равновесный каркасно-капиллярный напор (ψ_p) по всей глубине расчётной толщи равен $\psi_p = H_p + x$, а так как при равновесии полный напор во всех точках должен быть одинаков и равен $\psi_p = -h_T + x$. Естественно, что под уровнем грунтовых вод, т.е. при $x > h_T$, $\omega = m$.

На равновесную эпюру накладываем эпюру влажности при весеннем увлажнении, которую подсчитываем по выражению:

$$\omega = \text{ППВ} \exp(-0,4x^2) \quad (2.36)$$

Это выражение даёт среднюю влажность в метровом слое равную примерно 0,8 - 0,9 ППВ, что не противоречит общепринятым представлениям о весенних влагозапасах в почвах. В качестве начальной влажности принимается наибольшая из равновесной и подсчитанной по выражению (2.36).

В результате решения системы уравнений (2.21) для всех блоков, то есть для $i = 1 \dots N$, на каждый шаг по времени получаем эпюру влажности и напоров, по выражению (2.10) определяем потоки влаги, т.е. получаем информацию о количестве влаги в почве и о её движении под действием практически всех

значимых факторов. Далее анализируя среднюю влажность в контролируемом слое и сравнивая её с допустимыми пределами регулирования и изменяя граничные условия на поверхности почвы, установить моменты начала и конца поливов, определять поливные нормы, производить оценку влагообмена между корнеобитаемым и низ лежащими слоями почвы и грунтов. Возможно так же оценить рекомендуемый режим поливов, то есть с известными сроками и нормами поливов, или задавать предполивную влажность и размер поливной нормы. Так же возможно задавать переменную во времени толщину корнеобитаемой зоны и толщину слоя, в котором контролируется влажность.

Следует отметить, что модель передвижения влаги является обязательной для построения модели передвижения азота.

2.4. Моделирование передвижения азотных соединений в почве

Основным источником поступления азота в почву, в данном исследовании являются сточные воды животноводческих комплексов. Как уже отмечалось ранее, азот в животноводческих стоках содержится в основном в виде аммония, непосредственно в виде нитратов и других соединений он содержится в незначительных количествах. Содержание нитратов в почве в основном определяется процессами нитрификации и денитрификации, а также отбором корнями растений.

Перечисленные факторы в пункте 2.3 определяют динамику азота в почве и подстилающих грунтах, с изменением действующих факторов по глубине до уровня грунтовых вод.

Сказанное позволяет записать общепринятое дифференциальное уравнение для аммония в виде [9, 113, 159, 160, 164]:

$$\frac{\partial(\omega C_a)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\omega D_k \frac{\partial C_a}{\partial x} \right) - \frac{\partial(q C_a)}{\partial x} - \frac{\partial S_a}{\partial t} - K_1 \omega C_a - Q_a \quad (2.37)$$

для нитратов NO_3 – в виде:

$$\frac{\partial(\omega C_n)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\omega D_k \frac{\partial C_n}{\partial x} \right) - \frac{\partial(q C_n)}{\partial x} + K_1 \omega C_a - K_2 \omega C_n - Q_n \quad (2.38)$$

В этих уравнениях:

C_a , C_n – концентрация аммония и нитратов в почвенном растворе, соответственно, грэкв/м³_в;

$\frac{\partial S_a}{\partial t}$ – интенсивность сорбции или десорбции аммония почвенным поглощающим комплексом, грэкв/м³/сут;

K_1 и K_2 – коэффициенты скорости нитрификации и денитрификации, соответственно, 1/сут;

Q_a и Q_n – интенсивность отбора аммонийного и нитратного азота корнями растений из единичного объема почвы, соответственно, грэкв/м³/сут;

ω – объёмная влажность почвы, м³_в/м³;

q – объёмный поток почвенной влаги, м³_в/м²/сут;

D_k – коэффициент конвективной диффузии, м²/сут;

$$D_k = D_M + \lambda|q| \quad (2.39)$$

D_M – коэффициент молекулярной диффузии, принят равным 0,0004 м²/сут;

λ – параметр дисперсии, для суглинистых почв он равен 0,1...0,2 м, для тяжелосуглинистых – 0,2...0,5, для глинистых – 0,5...1,0 м (примечание – размерность λ м⁴/м³_в/сут, но для удобства восприятия информации его выражают в метрах).

Значение влажности почвы и потоков влаги, изменяющиеся по глубине и во времени, принимаются в результате параллельного расчёта передвижения влаги. Интенсивность сорбции аммония почвенным поглощающим комплексом обычно описывают выражением:

$$\frac{\partial S_a}{\partial t} = -\beta(\alpha S_a - \omega C_a) \quad (2.40)$$

где β – коэффициент скорости сорбционного обмена, для суглинистых почв он лежит в пределах 0,02...0,2 1/сут;

α – безразмерный коэффициент распределения вещества, характеризующий физико-химические свойства катиона и почвенного поглощающего комплекса.

Распределение катионов на поверхности коллоидных частиц, величина $1/\alpha$ называется константой Генри, для суглинистых почв $\alpha = 0,2...1,0$.

Решая уравнение (2.40) при $t \rightarrow \infty$ получаем, предельное (равновесное) количество сорбированного катиона будет равно $S_a^0 = \omega \cdot C_a / \alpha$, то есть это выражение предполагает линейный закон сорбции и при неограниченном росте концентрации катиона в растворе количество сорбированного катиона также растёт неограниченно, что не соответствует действительности, так как ёмкость ППК ограничена. Иными словами, реализованный здесь закон Генри справедлив только при малых концентрациях.

В чернозёмных почвах ёмкость поглощения значительна и может достигать 40...50 мгэкв/100г почвы, то есть до 1% массы почвы, но значительная её часть заполнена кальцием и магнием. Поэтому, важно отметить, что кинетику сорбции аммония необходимо рассчитывать совместно с другими катионами и учитывать ограниченную ёмкость поглощения. Для упрощения задачи было сделано предположение, что в результате поливов сточными водами количество поглощённого кальция и магния существенно меняться не будет, и составит 0,85...0,95 ёмкости ППК, оставшаяся часть «доступна» для сорбции аммония.

В этом случае необходима нелинейная изотерма сорбции NH_4^+ , которая при значительном росте концентрации аммония может иметь место сразу после грузного полива сточными водами, которая ограничивала бы количество поглощённого аммония заданным пределом S_{\max} , но вместе с тем, при малых концентрациях реализовывала закон Генри. Предложена следующая изотерма сорбции:

$$S_a^0 = S_{\max} \left(1 - \exp\left(-\frac{\omega C_a}{\alpha S_{\max}}\right) \right) \quad (2.41)$$

Видно, что при $C_a \rightarrow 0$ $\partial S_a^0 / \partial C_a = \omega / \alpha$ и что при $C_a \rightarrow \infty$ $S_a^0 \rightarrow S_{\max}$. Вместе с тем желательно сохранить вид выражения (2.40), удобный для расчётов, поэтому запишем его в виде:

$$\frac{\partial S_a}{\partial t} = -\beta(\chi S_a - \omega C_a) \quad (2.42)$$

где $\chi = \frac{\omega \cdot C_a}{S_a^0}$; а S_a^0 определяется по (2.41).

Иначе

$$\frac{\partial S_a}{\partial t} = -\beta \frac{\omega C_a}{S_a^0} (S_a - S_a^0) \quad (2.42.1)$$

То есть основная гипотеза, заложенная в закон сорбции, говорящая, о том что интенсивность сорбции пропорциональна отклонению содержания сорбированного вещества от равновесного, соблюдается. Решая уравнение (2.42), получаем:

$$S_a = \frac{\omega \cdot C_a}{\chi} (1 - \exp(-\beta \cdot \chi \cdot t)) \quad (2.42.2)$$

и при $t \rightarrow \infty$ $S_a = \frac{\omega \cdot C_a}{\chi} = S_a^0$.

Иными словами, сохранён псевдо линейный закон сорбции с переменным коэффициентом χ , облегчающий счёт по неявной схеме, так как при небольших β и шагах по времени не более 1 сут. коэффициент χ можно считать по значению концентрации на предыдущий шаг C_{ai}^j .

2.5. Константы нитрификации и денитрификации

Нитрификация зависит от влажности, температуры и рН почвы. В связи с этим коэффициент скорости нитрификации принят изменяющимся следующим образом:

$$K_{1,i} = K_{1\max} f_1(\omega_1) f_2(\theta_i^j) \quad (2.43)$$

где $K_{1\max}$ – коэффициент скорости нитрификации при оптимальной влажности 0,6...0,8ППВ и температуре почвы 28...30⁰С, и рН=7...8.

Для чернозёмов при оптимальной влажности и температуре почвы, по обобщённым данным И. П. Айдарова [9] он равен 0,02...0,05 1/сут., а по данным [157, 163] 0,15...0,2, который изменяется, в зависимости от почвенных и климатических условий региона.

$f_1(\omega_i)$ – функция, учитывающая влажность почвы в данном расчётном блоке, которая с учётом данных [48] принята равной:

в диапазоне $\omega_M < \omega < 0,6\text{ППВ}$: $f_1 = \frac{\omega - \omega_M}{0,6\text{ППВ} - \omega_M}$; при $\omega < \omega_M$; $f_1 = 0$;

$0,6\text{ППВ} \leq \omega \leq 0,8\text{ППВ}$: $f_1 = 1$;

$0,8\text{ППВ} < \omega < m$: $f_1 = \frac{m - \omega}{m - 0,8\text{ППВ}}$;

$f_2(\theta^j)$ – функция, учитывающая температуру почвы в рассматриваемом блоке. Если данные об изменении температуры отсутствуют, то можно полагать, что:

$$f_2(\theta^j) = \frac{\theta^j}{\theta_{\max}} \exp(-x_i); \text{ при } x_i > 1,5 \text{ м } f_2(\theta^j) = 0 \quad (2.49)$$

где θ^j – средняя температура воздуха в данную декаду;

θ_{\max} – максимальная среднедекадная температура воздуха в рассматриваемом году;

x_i – глубина, на которой расположена середина i - того блока.

Для такого приёма были следующие предпосылки. Выполненный анализ температур на поверхности почвы и на глубине 5 - 10 см за двадцатилетний ряд метеонаблюдений по 14^{ти} областям РФ расположенных с севера на юг (крайняя северная область – Ленинградская, крайняя южная – Ставропольский край) показал (рисунок 2.1), что, во-первых, температура на поверхности почвы в среднем за вегетацию превышает температуру почвы на глубине 5 см в среднем на 3...5⁰С, и практически каждый год наблюдается декада, когда температура у поверхности почвы приближается (северные области) или достигает (южные области) оптимальной для интенсивной нитрификации.



Субъекты Российской Федерации

- | | | | | |
|----------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------------------------|
| Донецкая Народная Республика 10 | Республика Татарстан (Татарстан) 8 | Брянская область | Нижегородская область 3 | Херсонская область |
| Луганская Народная Республика 11 | Республика Тыва | Владимирская область | Новгородская область 2 | Челябинская область |
| Республика Адыгея (Адыгея) 13 | Удмуртская Республика 5 | Волгоградская область | Новосибирская область | Ярославская область |
| Республика Алтай | Республика Хакасия | Вологодская область | Омская область | Еврейская автономная область 22 |
| Республика Башкортостан | Чеченская Республика 19 | Воронежская область | Оренбургская область | Ненецкий автономный округ |
| Республика Бурятия | Чувашская Республика — Чувашия 7 | Запорожская область | Орловская область | Ханты-Мансийский автономный округ — Югра |
| Республика Дагестан 20 | Алтайский край | Ивановская область | Пензенская область | Чукотский автономный округ |
| Республика Ингушетия 18 | Забайкальский край | Иркутская область | Псковская область | Ямало-Ненецкий автономный округ |
| Кабардино-Балкарская Республика 16 | Камчатский край | Калининградская область | Ростовская область | Города федерального значения: |
| Республика Калмыкия | Краснодарский край 12 | Калужская область | Рязанская область | Москва, Санкт-Петербург, Севастополь |
| Карачаево-Черкесская Республика 15 | Красноярский край | Кемеровская область — Кузбасс 21 | Самарская область | |
| Республика Карелия | Пермский край | Кировская область | Саратовская область | |
| Республика Коми | Приморский край | Костромская область | Сахалинская область | |
| Республика Крым 9 | Ставропольский край 14 | Курганская область | Свердловская область | |
| Республика Марий Эл 4 | Хабаровский край | Курская область | Смоленская область | |
| Республика Мордовия 6 | Амурская область | Ленинградская область 1 | Тамбовская область | |
| Республика Саха (Якутия) | Архангельская область | Липецкая область | Тверская область | |
| Республика Северная Осетия — Алания 17 | Астраханская область | Магаданская область | Томская область | |
| | Белгородская область | Московская область | Тульская область | |
| | | Мурманская область | Тюменская область | |
| | | | Ульяновская область | |

Примечания:
 1) Названия областей, автономных округов и городов федерального значения даны на 4 октября 2022 г.

Рисунок 2 1 – Карта областей РФ.

Во-вторых, среднедекадная температура почвы на глубине 5 см и среднедекадная температура воздуха изменяются синхронно, наблюдается совпадение их максимумов, поэтому в декады, отличные от наиболее жаркой, можно считать, что функция $f_2(\theta^j)$ пропорциональна отношению θ^j/θ_{\max} . В расчётах для уменьшения исходной информации последнее отношение заменено на $E_0^j/E_{0\max}$. Это даёт возможность не фиксировать во времени самую жаркую декаду, которая перемещается в довольно широком временном диапазоне, как внутри многолетнего ряда наблюдений, так и по исследуемым областям.

Для учёта снижения температуры почвы с глубиной в выражении (2.49) присутствует множитель $\exp(-x_i)$, а также принято, что на глубине порядка 1,5м

процесс нитрификации должен прекращаться из-за понижения температуры примерно до 10°C и менее, а также из-за уменьшения кислорода в поровом пространстве.

Интенсивность денитрификации также находится в зависимости от температуры, влажности и рН почвы, поэтому:

$$K_2 = K_{2\max} f_3(\omega_i) f_2(\theta^j) \quad (2.50)$$

По И.П. Айдарову [9] для чернозёмов $K_{2\max} = 0,02...0,04$ 1/сут при влажности почвы, превышающей ППВ и температуре порядка $28...30^{\circ}\text{C}$. По данным [113, 157, 163] $K_{2\max} = 0,012...0,025$ в зависимости от условий, указанных выше. Учёт температуры здесь осуществлён также как для процесса нитрификации, а вот влажность почвы влияет на денитрификацию иначе: наиболее интенсивно последняя проходит при высокой влажности и снижается при иссушении почвы, поэтому принято, что:

$$f_3(\omega_i) = \exp\left[-2\left(\frac{\text{ППВ} - \omega_i}{\text{ППВ} - \omega_M}\right)^2\right]; \text{ при } \omega_i > \text{ППВ} \quad f_3(\omega_i) = 1 \quad (2.51)$$

То есть при влажности близкой к максимальной гигроскопичности $f_3(\omega_i) \cong 0,1$, что согласуется с данными [9,48].

2.6. Отбор азотных соединений корнями растений

Интенсивность отбора азота корнями растений моделировалась следующим образом. Зная максимально возможный вынос чистого азота растениями и урожайность при высоком азотном питании, которые зависят от вида растений, почвенно-географических условий и водно-воздушного режима почв, с помощью модели урожайности, описанной в пункте 2.5, определяется вынос чистого азота W_{AZ} за вегетацию. Далее вынос распределялся по декадам вегетации. Для этого использовались применяемые В.В. Шабановым коэффициенты вклада декады в конечную продуктивность или урожайность,

где j – номер декады, при этом $\sum_{j=1}^{j=n} \alpha_n(j) = 1$, где n – число декад в вегетационном

периоде. Поэтому скорость выноса чистого азота составит:

$$V_{AZ}^j = \alpha_n(j)W_{AZ}/10/14, \text{ грэкв/м}^2/\text{сут} \quad (2.52)$$

где 10 – число дней в декаде;

14 – атомный вес азота.

Потребление растениями в виде NH_4^+ или NO_3^- принималось зависящим от соотношения их концентраций в почвенном растворе, средних по всей глубине корнеобитаемой зоны C_a^j и C_n^j , в соответствии с уравнением кинетики Михаэлиса - Ментона [150, 153, 154, 163]:

$$V_a^j = V_{AZ}^j \frac{C_a^j}{K_m + C_a^j + C_n^j}; \quad V_n^j = V_{AZ}^j \frac{C_n^j}{K_m + C_a^j + C_n^j} \quad (2.53)$$

где K_m – константа Михаэлиса, грэкв/м³_в или мгэкв/литр.

Суточное потребление азота необходимо распределить по глубине корнеобитаемой зоны. Использовалась наиболее простая гипотеза, заключающаяся в том, что интенсивность отбора влаги корнями растений, выражение (2.9), так как по имеющимся в литературе сведениям азот в корни поступает преимущественно конвективным путём вместе с почвенной влагой [150, 151, 152, 154, 161, 162]. Поэтому:

$$Q_{ai}^j = V_a^j \varepsilon_i / \sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon_i h_i, \text{ грэкв/м}^3/\text{сут} \quad (2.54)$$

$$Q_{ni}^j = V_n^j \varepsilon_i / \sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon_i h_i, \text{ грэкв/м}^3/\text{сут} \quad (2.55)$$

Для численной реализации модели уравнения (2.37) и (2.38) запишем в виде системы конечно-разностных уравнений по неявной схеме для их решения:

$$\begin{aligned} \frac{\omega_i^{j+1} C_{ai}^{j+1} - \omega_i^j C_{ai}^j}{\Delta t} = \frac{2D_{kj-1}}{h_i} \times \frac{C_{ai-1}^{j+1} - C_{ai}^{j+1}}{h_{i-1} + h_i} - \frac{2D_{ki}}{h_i} \times \frac{C_{ai}^{j+1} - C_{ai+1}^{j+1}}{h_i + h_{i+1}} + \frac{q_{i-1}^{j+1}}{h_i} C_{ai-1}^{j+1} - \frac{q_i^{j+1}}{h_i} C_{ai}^{j+1} + \\ + \beta \left(\chi S_{ai}^j - \omega_i^{j+1} C_{ai}^{j+1} \right) - K_{1i}^j \omega_i^{j+1} C_{ai}^{j+1} - Q_{ai}^j \end{aligned} \quad (2.56)$$

$$\begin{aligned} \frac{\omega_i^{j+1} C_{ni}^{j+1} - \omega_i^j C_{ni}^j}{\Delta t} = \frac{2D_{ki-1}}{h_i} \times \frac{C_{ni-1}^{j+1} - C_{ni}^{j+1}}{h_{i-1} + h_i} - \frac{2D_{ki}}{h_i} \times \frac{C_{ni}^{j+1} - C_{ni+1}^{j+1}}{h_i + h_{i+1}} + \frac{q_{i-1}^{j+1}}{h_i} C_{ni-1}^{j+1} - \frac{q_i^{j+1}}{h_i} C_{ni}^{j+1} + \\ K_{1i}^j \omega_i^{j+1} C_{ai}^{j+1} - K_{2i}^j \omega_i^{j+1} C_{ni}^{j+1} - Q_{ni}^j \end{aligned} \quad (2.57)$$

$$S_{ai}^{j+1} = S_{ai}^j - \Delta t \beta \left(\chi_i^j S_{ai}^j - \omega_i^{j+1} C_{ai}^{j+1} \right) \quad (2.58)$$

$$\chi_i^j = \omega_i^j C_{ai}^j / S_{ai}^{0j}; S_{ai}^{0j} = S_{\max i} \left[1 - \exp\left(-\frac{\omega_i^j C_{ai}^j}{\alpha S_{\max i}}\right) \right] \quad (2.59)$$

$$D_{k_{i-1}} = \omega_{i-1}^{j+1} (D_M + \lambda |q_{i-1}^{j+1}|); D_{ki} = \omega_i^{j+1} (D_M + \lambda |q_i^{j+1}|)$$

Затем используем метод прогонки, для чего эти уравнения записываем в для аммония виде:

$$\alpha_i C_{ai+1}^{j+1} - b_i C_{ai}^{j+1} + \gamma_i C_{ai-1}^{j+1} = \delta_i \quad (2.60)$$

$$\text{где } \alpha_i = \frac{2D_{ki}}{h_i(h_{i+1} + h_i)}; \gamma_i = \frac{2D_{k_{i-1}}}{h_i(h_i + h_{i-1})} + \frac{q_{i-1}^{j+1}}{h_i}$$

$$b_i = \frac{1}{h_i} \left(\frac{2D_{ki}}{h_{i+1} + h_i} + \frac{2D_{k_{i-1}}}{h_i + h_{i-1}} + q_i^{j+1} \right) + \omega_i^{j+1} (\beta + K_{1i}^j + 1/\Delta t)$$

$$\delta_i = Q_{ai}^j - \omega_i^j C_{ai}^j / \Delta t - \beta \chi_i^j S_{ai}^j$$

для нитратов:

$$\alpha_i C_{ni+1}^{j+1} - b_i C_{ni}^{j+1} + \gamma_i C_{ni-1}^{j+1} = \delta_i \quad (2.61)$$

$$\text{где } \alpha_i = \frac{2D_{ki}}{h_i(h_{i+1} + h_i)}; \gamma_i = \frac{2D_{k_{i-1}}}{h_i(h_i + h_{i-1})} + \frac{q_{i-1}^{j+1}}{h_i}$$

$$b_i = \frac{1}{h_i} \left(\frac{2D_{ki}}{h_{i+1} + h_i} + \frac{2D_{k_{i-1}}}{h_i + h_{i-1}} + q_i^{j+1} \right) + \omega_i^{j+1} (K_{ai}^j + 1/\Delta t)$$

$$\delta_i = Q_{ni}^j - \omega_i^j C_{ni}^j / \Delta t - K_{1i}^j \omega_i^{j+1} C_{ai}^j$$

При прямой прогонке по формулам (2.23) определялись прогоночные коэффициенты, а по формуле (2.24) – значения концентраций C_{ai}^{j+1} и C_{ni}^{j+1} .

2.7. Граничные условия

Граничные условия на поверхности почвы учитываются при вычислении первых значений прогоночных коэффициентов. В межполивной период, когда поток ионов через поверхность почвы отсутствовал, для обоих ионов в этот период $q_i^{j+1} = -E_f^j$:

$$P_1 = \frac{a}{a + q_1^{j+1}}; Q_1 = 0; a = 2D_{k_1}/h_2; D_{k_1} = \omega_1^{j+1} (D_M + \lambda |q_1^{j+1}|) \quad (2.62)$$

Во время поливов учитывается поток ионов, содержащихся в поливной воде:

$$\text{для } \text{NH}_4^+ \quad P_1 = \frac{a}{a + q_1^{j+1}}; \quad Q_1 = \frac{q_1^{j+1} C_{apv}}{a + q_1^{j+1}} \quad (2.63)$$

$$\text{для } \text{NO}_3^- \quad P_1 = \frac{a}{a + q_1^{j+1}}; \quad Q_1 = \frac{q_1^{j+1} C_{npv}}{a + q_1^{j+1}} \quad (2.64)$$

где C_{apv} и C_{npv} – концентрация ионов NH_4^+ и NO_3^- в поливной воде, q_1^{j+1} – скорость впитывания поливной воды.

Условия на нижней границе расчётной толщи, то есть при $x=L$, учитывалось при вычислении последних значений концентраций C_{aN}^{j+1} и C_{nN}^{j+1} . При глубоком залегании грунтовых вод $h_r \gg L$ и при неглубоких, переменных во времени уровнях грунтовых вод $h_r < L$, на нижней границе принимается, что градиент концентрации отсутствует. Отсюда для обоих случаев:

$$C_{aN}^{j+1} = \frac{Q_{N-1}}{1 - P_{N-1}}; \quad C_{nN}^{j+1} = \frac{Q_{N-1}}{1 - P_{N-1}} \quad (2.65)$$

Здесь используются прогоночные коэффициенты P_{N-1} и Q_{N-1} , соответствующие NH_4^+ и NO_3^- . Потоки ионов через нижнюю границу при этом равны:

$$q_{aN-1}^{j+1} = q_{N-1}^{j+1} C_{aN}^{j+1}; \quad q_{nN-1}^{j+1} = q_{N-1}^{j+1} C_{nN}^{j+1} \quad (2.66)$$

При фиксированной во времени глубине грунтовых вод $h_r=L$ принимается единственное возможное условие, что концентрации здесь постоянны и равны:

$$C_{aN}^{j+1} = C_{aГВ}; \quad C_{nN}^{j+1} = C_{nГВ} \quad (2.67)$$

где $C_{aГВ}$ и $C_{nГВ}$ – содержание аммония и нитратов в грунтовых водах.

Потоки ионов через нижнюю границу в этом случае составляют:

$$q_{aN-1}^{j+1} = \frac{2D_{kN-1}}{h_{N-1}} (C_{aN-1}^{j+1} - C_{aN}^{j+1}) + q_{N-1}^{j+1} C_{aN-1} \quad (2.68)$$

$$q_{nN-1}^{j+1} = \frac{2D_{kN-1}}{h_{N-1}} (C_{nN-1}^{j+1} - C_{nN}^{j+1}) + q_{N-1}^{j+1} C_{nN-1} \quad (2.69)$$

В результате решения систем уравнений (2.57) – (2.59) для всех блоков вслед за решением уравнений влагопереноса получаем на каждый шаг по времени эпюры концентраций аммония и нитратов, а также содержание аммония в почвенном поглощающем комплексе. Это позволяет независимым

образом определить все составляющие баланса аммонийного и нитратного азота: поступление с поливной водой, отбор корнями растений, вынос ионов за пределы почвенного слоя и за пределы расчётной толщи, то есть поступление в грунтовые воды, с учётом процессов нитрификации и денитрификации.

2.8. Модель продуктивности растений

При поиске оптимальных режимов поливов сточными водами животноводческих комплексов необходимо учитывать реакцию растений на изменение влажности почвы в корнеобитаемом слое. Известно, что требования растений к влажности почвы изменяются в течение вегетации. Для этих целей в расчётах использовалась модель накопления продуктивности, предложенная В.В. Шабановым [7, 145]:

$$U_{\omega} = U_0 \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_{n_i} K_{\omega_i} \quad (2.70)$$

где U_{ω} – продуктивность (урожайность) при данном варианте режима полива и соответствующей ему динамики влажности почвы в корнеобитаемом слое;

U_0 – максимально возможная продуктивность при оптимальной для растений динамике влажности;

α_{n_i} – вклад i -той декады в формирование продуктивности, зависящей от фазы развития растения;

n – количество декад в вегетационном периоде;

K_{ω_i} – коэффициент, определяющий снижение продуктивности из-за отклонения влажности от оптимальной в i -тую декаду:

$$K_{\omega_i} = \left(\frac{\theta_i}{\theta_{opt_i}} \right)^{\gamma_i \theta_{opt_i}} \left(\frac{1 - \theta_i}{1 - \theta_{opt_i}} \right)^{\gamma_i (1 - \theta_{opt_i})} \quad (2.71)$$

где $\theta_i = \frac{\omega_i - B3}{m - B3}$; $\theta_{opt_i} = \frac{\omega_{opt_i} - B3}{m - B3}$

ω_i – средняя за i -тую декаду влажность почвы в контролируемом слое ПОВЫ;

ω_{opt_i} – оптимальная влажность за i -тую декаду;

m – полная влагоёмкость;

B_3 – влажность завядания;

γ_i – коэффициент, учитывающий реакцию растений на отклонение влажности от оптимальной.

Урожайность конкретной культуры даже при оптимальной влажности зависит ещё от многих факторов, например, от степени засоления, осолонцевания или кислотности почвы, обеспеченности питательными веществами, от количества фотосинтетической активной радиации (ФАР) и другого. Учесть эти факторы при необходимости возможно введением соответствующих коэффициентов в формулу (2.70).

Поэтому показатели мелиоративных режимов обосновывались для многолетних условий. Так же, это позволяет оценить среднесуточную потребность в орошении, дренаже, изменение запасов солей и гумуса в почве и так далее. Помимо этого, возможно учесть изменения количества ФАР и его влияние на урожай следующим образом:

$$U_0 = K_f U \quad (2.72)$$

где U – урожайность данной культуры в многолетнем разрезе, по данным сортоучастков.

K_f – коэффициент, учитывающий изменчивость количества ФАР по годам. Обычно принимают линейную зависимость продуктивности от количества ФАР, поэтому можно положить, что $K_f = F_p / \bar{F}$, где F_p – количество ФАР в год p -той обеспеченности, \bar{F} – среднесуточное значение.

В модели оценка изменения урожайности производилась по изменению влажности почвы в корнеобитаемой зоне, то есть по формуле (2.70).

Выводы

1. Предложена нелинейная изотерма сорбции аммония ППК позволяющая вести расчёты при больших концентрациях последнего в почвенном растворе и вместе с тем при малых концентрациях реализуя закон Генри.

2. Разработаны численные алгоритмы расчёта на ЭВМ процессов миграции влаги и азотных соединений и их трансформаций в почвах и подстилающих грунтах. Составленная программа позволяет прогнозировать изменение экологической ситуации при учёте реальных почвенных, гидрогеологических и стохастических погодных условий индивидуально за каждый рассматриваемый год в составе исследуемого промежутка времени.

Глава 3. Сравнение экспериментальных исследований и математического моделирования передвижения азота в почве

С целью проверки соответствия математической модели реальным процессам совместной миграции азотных соединений в почвах и подстилающих грунтах было выполнено сравнение расчётных результатов с натурными исследованиями.

3.1. Характеристика объекта исследования

Исследования проводились в Тверской области в одном из свиноводческих хозяйств мощностью 65 тыс. голов (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Лагуны животноводческих стоков.

В настоящее время на ферме хозяйства содержится 65000 голов свиней. На комплексе навоз удаляется с помощью гидросмыва, т.е. животные находятся на бесподстилочном содержании.

Тверская область расположена на северо-западе Восточно-Европейской (Русской) равнины с характерным для неё чередованием низменностей и

возвышенностей. Западная часть области является главным водоразделом бассейнов Каспийского и Балтийского морей.

Для неё в целом характерен равнинный рельеф, где возвышенные всхолмленные участки мореных равнин и гряд сочетаются с обширными волнистыми водно-ледниковыми или плоскими озёрно-ледниковыми и аллювиальными низинами.

В рассматриваемой области за год в среднем выпадает 550 - 750 мм осадков. Из всей суммы осадков 70 % выпадают в жидком виде (дождь и морось), 18 % - в твёрдом (снег, град, снежная и ледяная крупа), 12 % – в смешанном виде (мокрый снег, дождь со снегом). Количество выпадающих осадков в отдельные годы может существенно отличаться от средних показателей. Влажность воздуха в области довольно высока на протяжении всего года и в среднем колеблется в пределах 80 %. В холодный период относительная влажность выше – 85 - 90 %, а летом она уменьшается до 65 - 70%.

Тверская область расположена в пределах Нечерноземной зоны Российской Федерации, целиком располагаясь в подзоне дерново-подзолистых почв южной тайги рельеф территории сформирован под влиянием деятельности ледника, водно-ледниковых потоков, морскими, озерными, речными водами.

Значительные территории покрыты лесами, большие площади занимают болота, преимущественно верховые. Основными формами рельефа являются обширные зандровые заболоченные равнины. Основными почвообразующими породами являются:

- покровные суглинки;
- карбонатные покровные суглинки;
- моренные отложения.

Основными процессами, формирующими почвенный покров территории Тверской области, являются подзолообразование, глееобразование, заболачивание и культурное почвообразование. Наибольшее распространение здесь получили дерново-подзолистые почвы различной степени оподзоливания и гидроморфизма.

Реакция почв чаще всего кислая по всему профилю, но возможно нейтральная в нижней, иногда в средней частях, профиля при наличии унаследованных карбонатов. Содержание гумуса изменяется от 0,5 до 2,5 % в гумусовом горизонте. В составе гумуса преобладают фульвокислоты. Поглощающий комплекс не насыщен основаниями. Запасы гумуса изменяются от 20 до 35 т/га на песчаных и супесчаных почвах и от 20 до 75 т/га на суглинистых почвах.

Наблюдается общая тенденция к снижению плодородия почв. Ежегодный дефицит гумуса составляет 600 – 700 кг/га. Большинство почв подвержены эрозии. В целом по области выявлено более 130 тыс. га смытых сельскохозяйственных угодий, 20% относятся к эрозийно опасным землям.

По данным землеустроительной службы, развитие эрозийных процессов, подтопление и заболачивание земель, зарастание кустарником и мелколесьем, привело к тому, что за последние 20 лет площадь сельскохозяйственных угодий значительно сократилось (рисунок 3.2)



Рисунок 3.2 – Земли Тверской области по категориям

Процессам заболачивания подвержены 24% земель, переувлажнено 19%, подвержено водной эрозии 11%, ветровой эрозии 2%.

Переувлажненные и заболоченные земли занимают 43% сельскохозяйственных угодий, или 537 тыс.га. На территории объекта залегают

дерново-подзолистые среднесуглинистые почвы со следующим морфологическим строением (рисунок 3.3):

A₁ – гумусовый горизонт, 0-27 см, белесовато-тёмный, комковато порошистой структуры, среднерыхлый суглинистый в большом количестве корни растений.

A₂ – подзолистый горизонт, 27-40 см, белесовато светло-серый с лёгким палевым оттенком вниз по профилю, мучнистый, уплотнённый, структура клетчатая, корней мало, переход заметный.

A₂B – переходный горизонт, 40-50 см, буровато-белесый, увлажнённый, более уплотнён, суглинистый, содержит обильную присыпку, встречаются языки горизонта A₂.

B₁ – элювиальный горизонт, 50-70 см, плотный, увлажнён, коричневатобурый с охристыми пятнами, структура ореховая, корни единичны, переход постепенный.

B₂ – 70-100 см, коричневатобурый, но окраска горизонта менее интенсивная, тяжелосуглинистый, плотный, структура орехово-призматичная, сильно увлажнён, местами признаки локального оглеения.



Рисунок 3.3 – Структура почвенного покрова Тверской области.

Согласно данным Д.И. Шашко [146] по агроклиматическому районированию, объект расположен на территории умеренного пояса с

умеренно-континентальным климатом, характеризуемым как достаточно влажный с соотношением осадки/испаряемость > 1. Зима холодная с температурой наиболее холодного месяца января -11⁰С, с высотой снежного покрова в середине зимы 40-60 см. Температура самого тёплого месяца июля +18,1⁰С. За период вегетации сумма температур > 10⁰С составляет 2000...2100⁰С. Продолжительность вегетации 140 - 150 суток.

Годовая сумма осадков составляет 500...600 мм, из них в период вегетации выпадает около половины от годовой нормы.

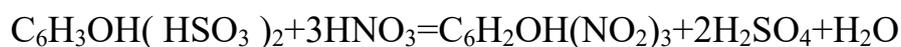
3.2. Методы определения содержания ионов NH⁺₄ и NO⁻₃ в почве

Содержание ионов NH⁺₄ и NO⁻₃ в почве проводилось согласно методическим указаниям [10, 122]. Аммонийный азот находится в почве в форме поглощённого (обменного катиона) и в виде водорастворимых солей OH определялся обработкой образцов почвы раствором KCl и дальнейшим колOMETРИРОВАНИЕМ с реактивом Несслера (щелочной раствор K₂HgI₄), при котором образуется йодистый меркураммоний NH₂Hg₂IO, окрашенный в жёлтый цвет:



Для связывания ионов кальция и магния, которые также переходят в раствор и мешают определению, к раствору прибавляют сегнетовую соль KNaC₄H₄O₆ · 4H₂O. Данный метод даёт результаты по содержанию в почве аммония в обменно-поглощённой форме и в почвенном растворе.

Нитраты извлекались из почвы при помощи дистиллированной воды и определялись колориметрически по методу Грандвалля-Ляжу. При взаимодействии нитратов с дисульфифеноловой кислотой в щелочной среде образуются производные, окрашенные в жёлтый цвет. Вначале образуются тринитрофенолы C₆H₃OH(NO₂)₃:



А после прибавления едкого кали-нитропроизводные, окрашенные в жёлтый цвет:



Если мешают хлориды и аммиачные соли, то вытяжку обрабатывают 5% раствором Ag_2SO_4 или 10% раствором K_2SO_4 соответственно.

3.3. Сравнение результатов исследования с расчетными данными

На рисунке 3.4 представлены эпюры начального содержания подвижных форм аммонийного и нитратного азота в метровом слое почвы на начало расчётного периода, определённые в результате проведения экспериментальных исследований. Эти данные были введены в программу в качестве исходных.

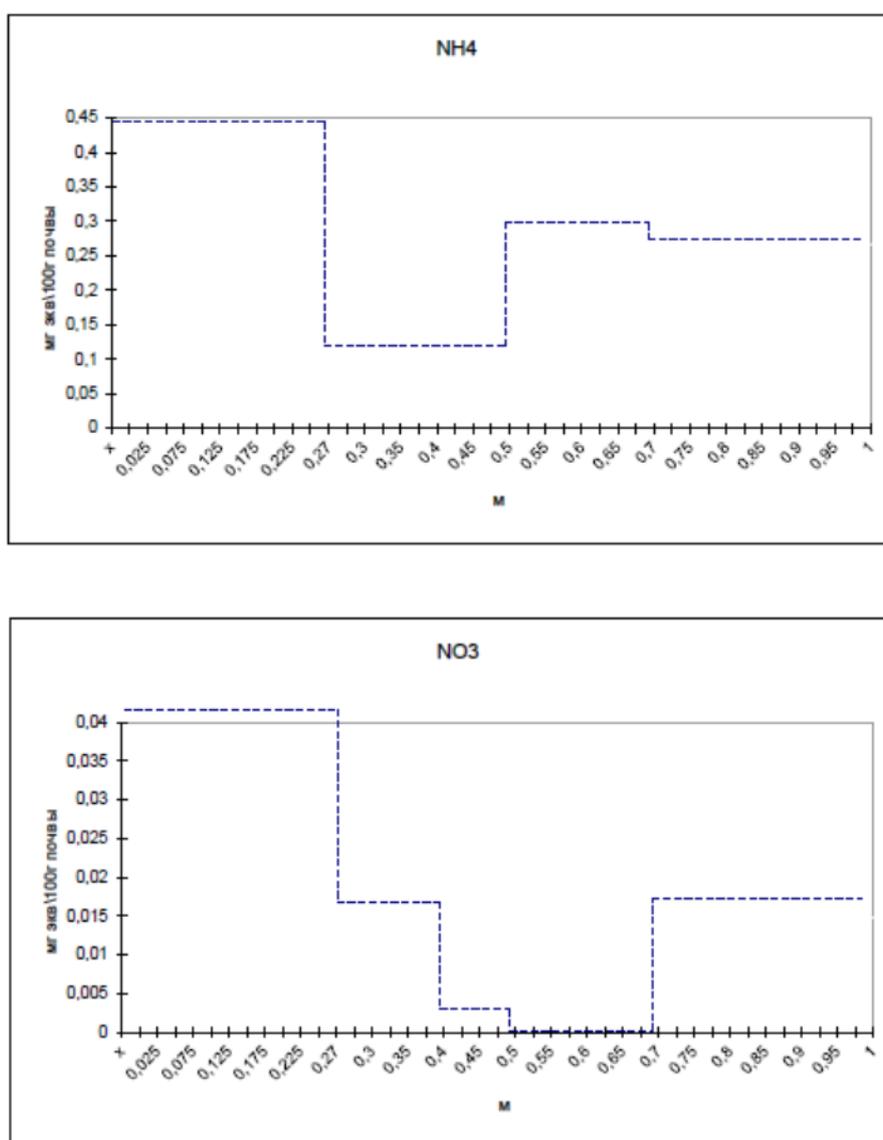


Рисунок 3.4 – Начальные эпюры содержания аммония и нитратов в почве.

Было проведено три полива под укосы многолетних трав. Внесено 210 кг/га аммиачного азота, концентрация в поливной воде составила 175 мг/л. Поливные нормы равнялись 400 м³/га, а оросительная норма составила 1200 м³/га.

Вынос азота с урожаем многолетних трав при орошении сточными водами КРС составил 138 кг с га за вегетационный период. Без орошения и удобрения соответственно 77 кг с га.

На рисунке 3.5 представлены эпюры содержания в почве аммонийного и нитратного азота в метровом слое почвы на конец расчётного периода полученные экспериментальным и расчётным путём, без полива животноводческими сточными водами.

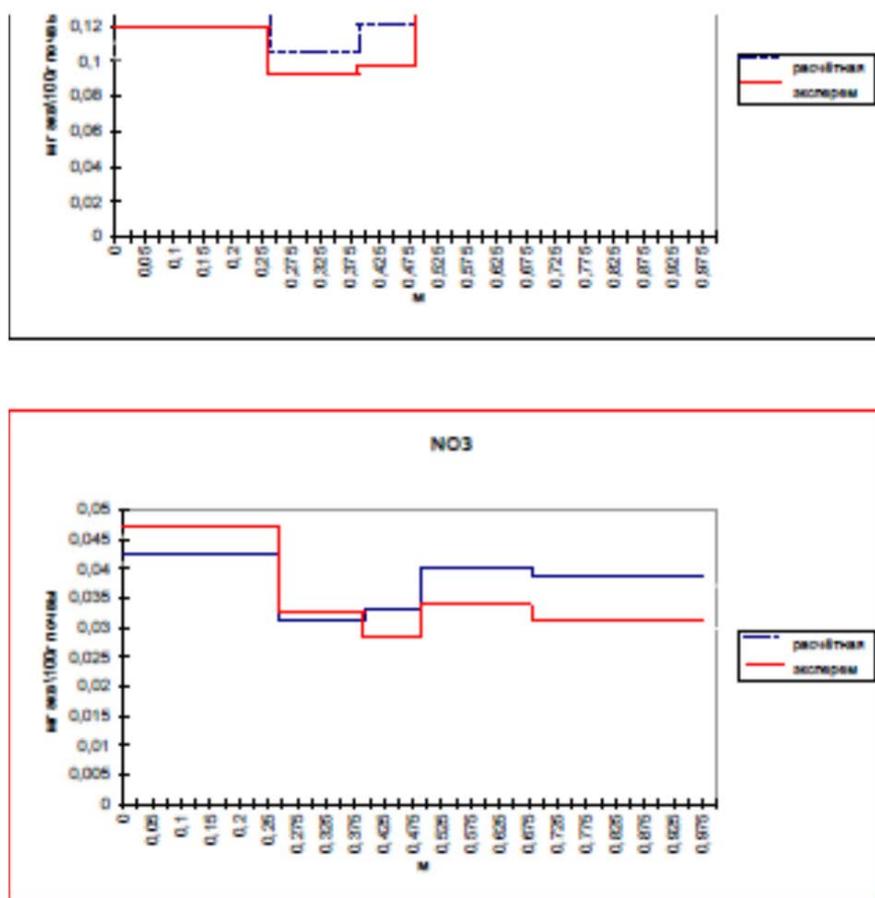


Рисунок 3.5 – Конечные эпюры содержания аммония и нитратов в почве без полива животноводческими сточными водами и внесения удобрений.

При анализе эпюр аммонийных соединений получилось, что минимальное отклонение расчётных результатов от экспериментальных составило 8% в горизонте А₁, а максимальное — 19,3% в горизонте В₂, в среднем по представленным почвенным горизонтам. По нитратным

соединениям отклонения соответственно составили 4,8% в горизонте А₂ и 19% в горизонте В₂.

При сопоставлении конечных эпюр аммонийного и нитратного азота в почве при осуществлении поливов сточными водами КРС (рисунок 3.6) отклонения экспериментальных и расчётных результатов составило: по аммонийным соединениям 2 % в горизонте А₂В и 17,3% в горизонте В₂, по нитратным соединениям соответственно 7,8% в А₂ и 17,1% в В₂.

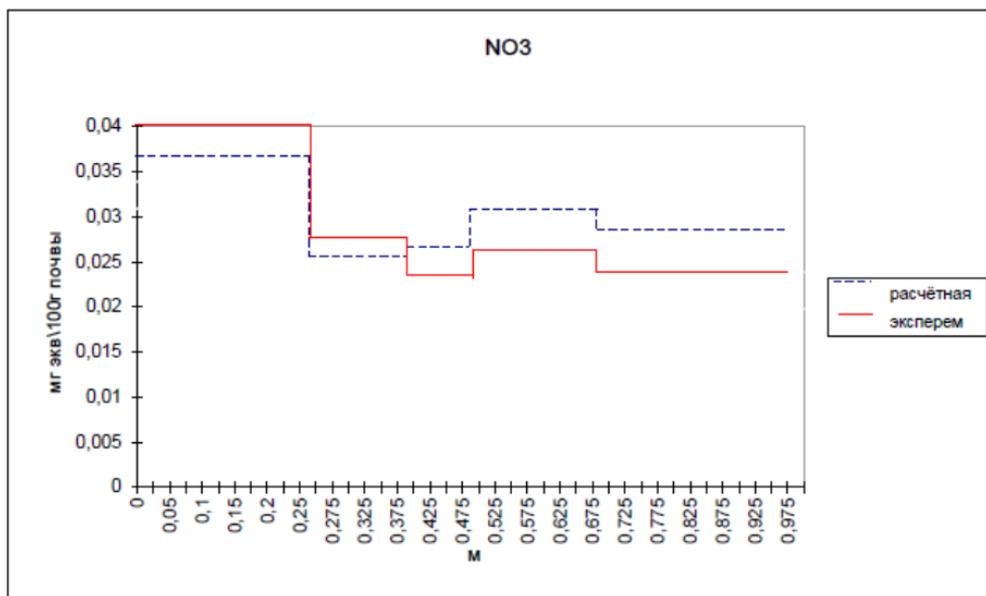


Рисунок 3.6 – Конечные эпюры содержания аммония и нитратов в почве при поливах животноводческими сточными водами.

Таким образом, сопоставление расчётных и экспериментальных эпюр содержания азотных соединений в почвенном слое позволяет сделать вывод, что математическая модель передвижения азотных соединений в почве совместно с моделями передвижения влаги и продуктивности растений обеспечивает приемлемую точность расчёта, что делает возможным использование расчётной модели для практических целей. Неполное соответствие расчётных и экспериментальных результатов очевидно связано с неизбежными погрешностями в экспериментальных исследованиях, а также использованием в модели ряда параметров, которые за неимением возможности определения экспериментальным путём были приняты по литературным данным.

Глава 4. Исходные данные для прогнозов

4.1. Почвенно-географические условия исследуемых областей

Были выполнены расчёты, на основе которых составлены прогнозы экологической ситуации и предложены оптимальные сценарии утилизации животноводческих стоков, по целому ряду областей РФ с различными почвенно-географическими и климатическими условиями.

Данные области расположены в основных сельскохозяйственных зонах РФ с севера страны на юг и охватывают как чернозёмные, так и нечернозёмные зоны в разных почвенно-биоклиматических поясах (таблица 4.1). Природные зоны и почвенные карты РФ представлены на рисунках 4.1- 4.5.



Рисунок 4.1 – Природные зоны РФ.



Рисунок 4.2 – Центрально-Черноземная зона РФ.

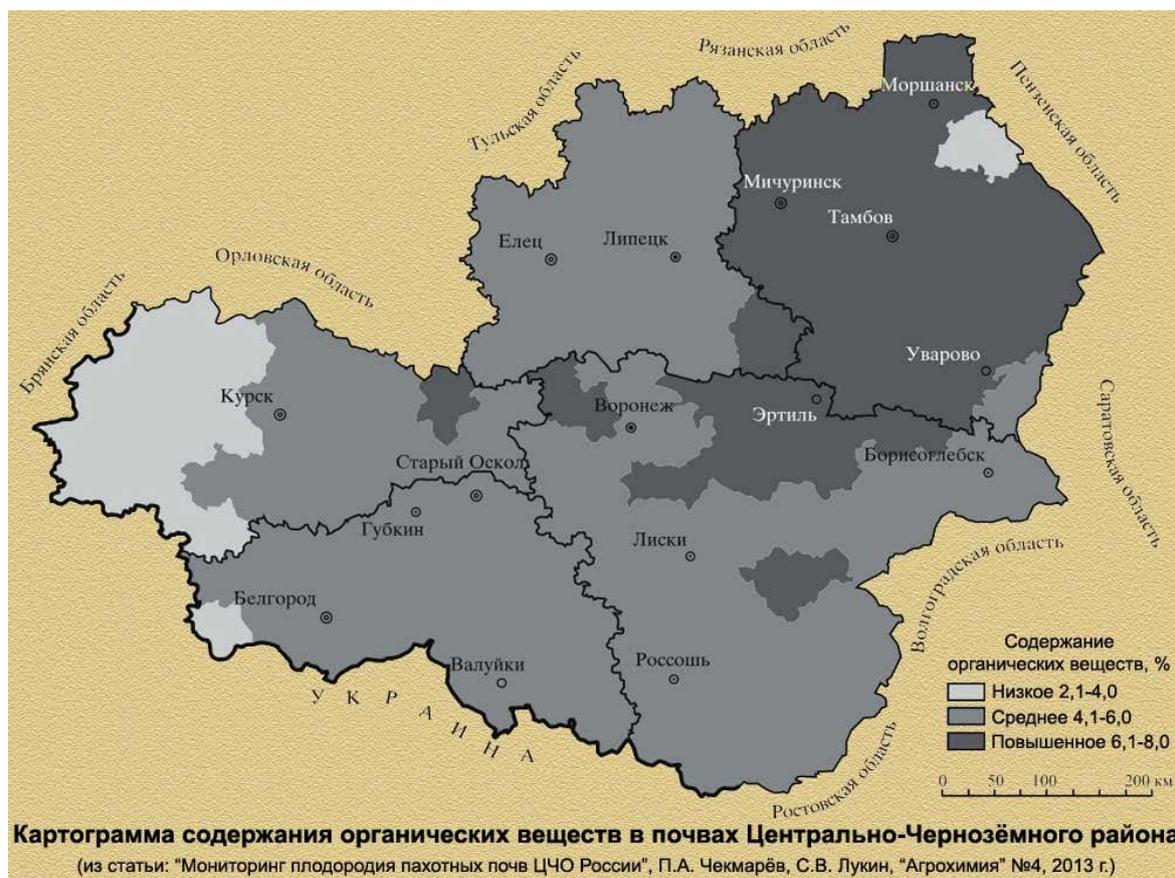


Рисунок 4.3 – Содержание органических веществ в почвах Центрально-Черноземного района.



Рисунок 4.4 – Почвенная карта России.



Рисунок 4.5 – Карта изменения с/х производства с 2019 г. в России.

В почвенно-географическом районировании почвенно-биоклиматические пояса, области и зоны являются таксономическими единицами и характеризуют разные уровни структур почвенного покрова.

Таксономическая система почвенно-географического районирования состоит из следующих соподчинённых единиц:

1. Почвенно-биоклиматический пояс.
2. Почвенно-биоклиматическая область.

Для равнинных территорий:

1. Почвенная зона
2. Почвенная провинция
3. Почвенный округ
4. Почвенный район

Почвенно-биоклиматический пояс представляет собой обширные территории поверхности суши, объединенные сходными радиационными и термическими условиями, одинаковым характером их влияния на развитие растительности и почвообразования.

Выделяют пять почвенно-биоклиматических поясов (рисунки 4.6 - 4.9): полярный (холодный), бореальный (умеренно холодный), суббореальный (умеренный), субтропический (умеренно тёплый) и тропический (тёплый). На территории РФ расположено первые четыре пояса.



Рисунок 4.6 – Полярный пояс.

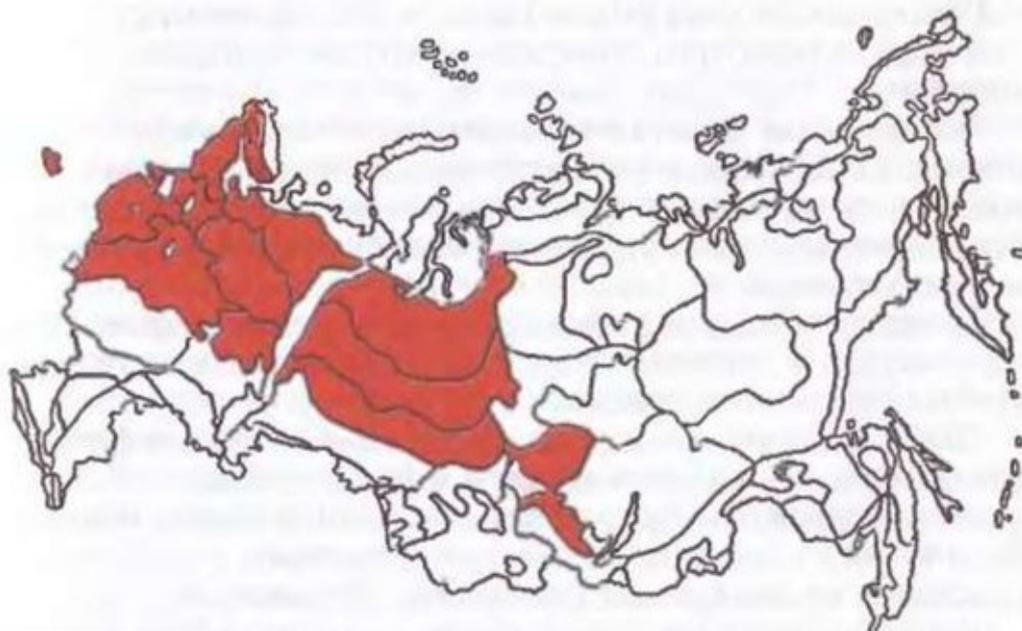


Рисунок 4.7 – Бореальный пояс.

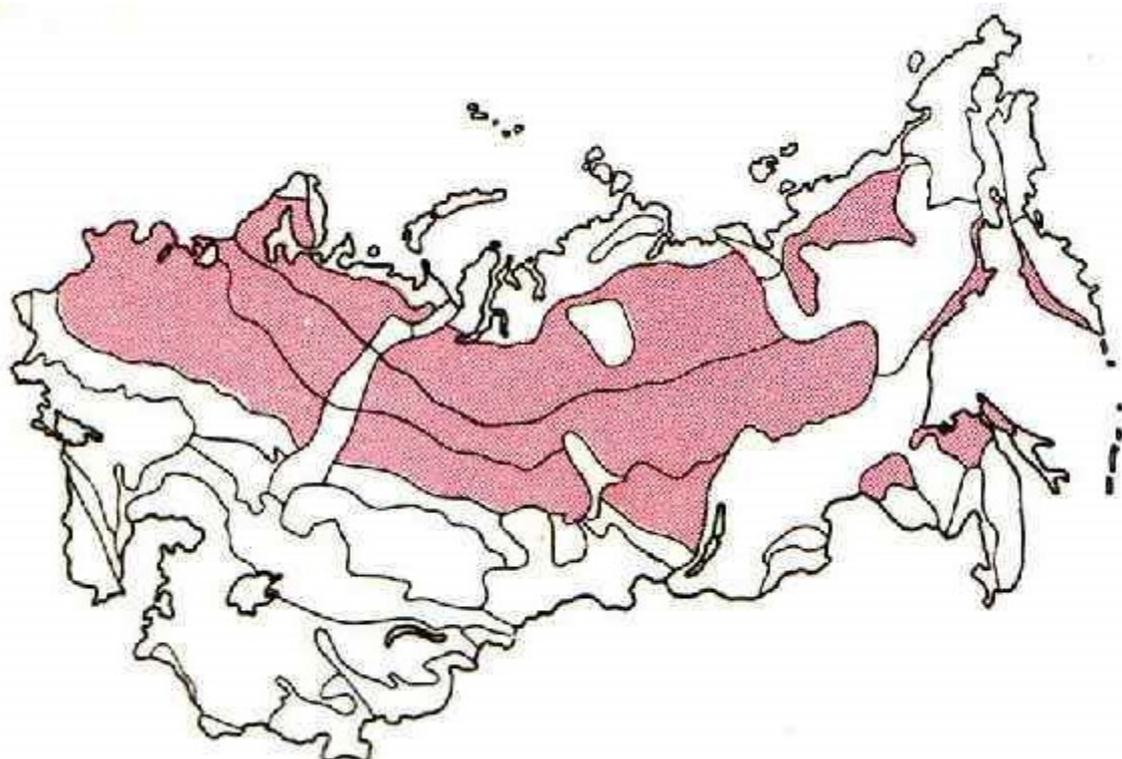


Рисунок 4.8 – Суббореальный пояс.

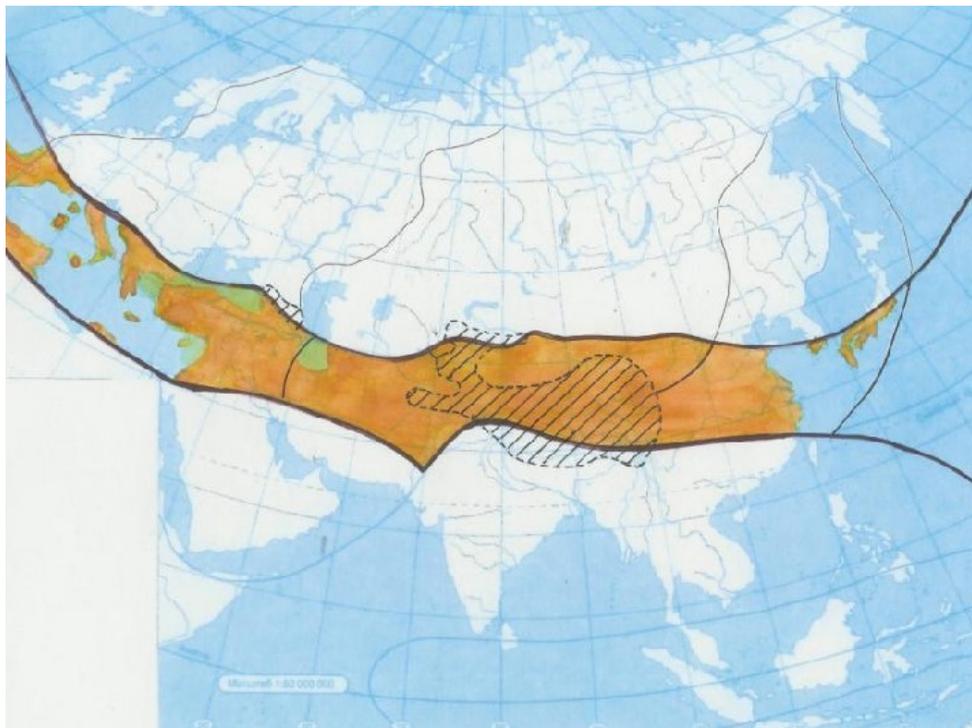


Рисунок 4.9 – Субтропический пояс.

Почвенно-биоклиматическая область, характеризующаяся различной степенью континентальности климата и увлажнения.

Различают влажные (экстрагумидные и гумидные), переходные (субгумидные и субаридные) и сухие (аридные и экстрааридные) области.

Почвенная зона – ареал распространения зонального почвенного типа и сопутствующих ему интразональных почв.

Почвенная провинция – это часть почвенной зоны, отличающаяся специфическими особенностями почв и условий почвообразования, связанными либо с различиями в увлажнении и континентальности, либо с температурными различиями.

Почвенные округа выделяются по особенностям почвенного покрова в пределах почвенных провинций, обусловленного характером рельефа и почвообразующих пород.

Почвенный район представляет собой часть почвенного округа и характеризуется однотипной структурой почвенного покрова [15, 117].

А) Бореальный биоклиматический пояс

Центральная таёжно-лесная область

1) Южнотаёжно-лесная зона дерново-подзолистых почв, преимущественно избыточно влажная и влажная, ниже среднего и среднеобеспеченная теплом.

На территории *Прибалтийской* провинции находится Ленинградская области, характеризуемой как избыточно влажной, ниже среднего обеспеченной теплом, с преобладанием дерново-подзолистых и дерново-корбанатных почв. Рельеф равнинный, однако, в Прибалтийской частично грядово-холмистый, чередующийся с плоскими, часто заболоченными низинами озёрно-ледникового происхождения.

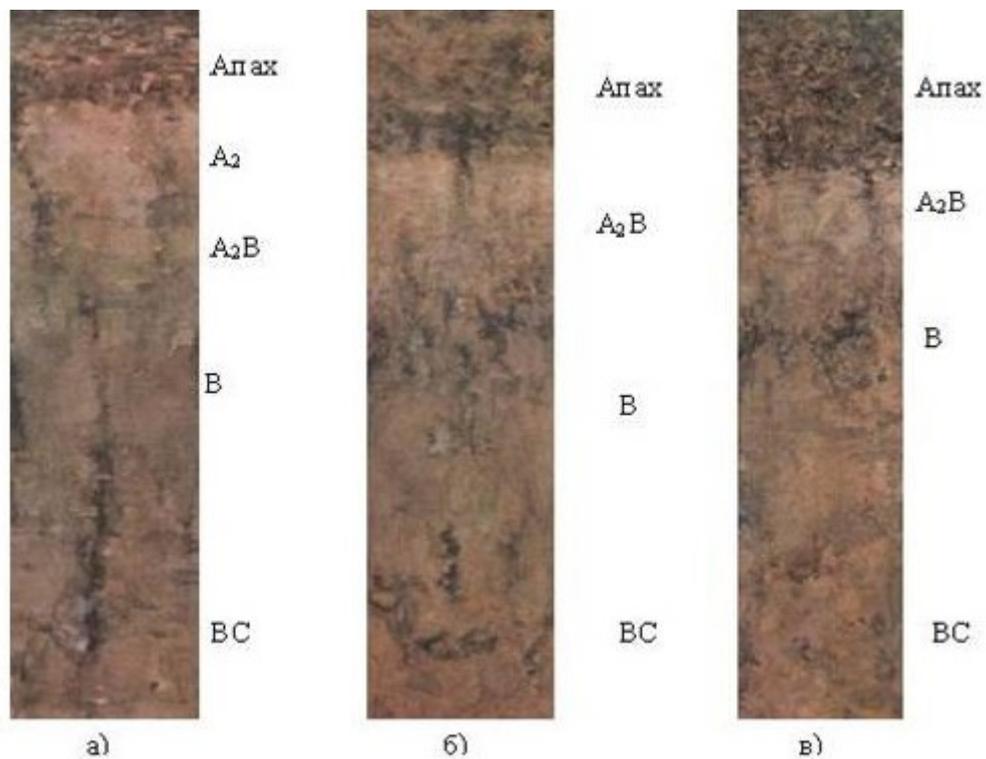


Рисунок 4.10 – Профили дерново-подзолистых почв: а) слабокультуренная; б) среднекультуренная; в) сильнокультуренная.

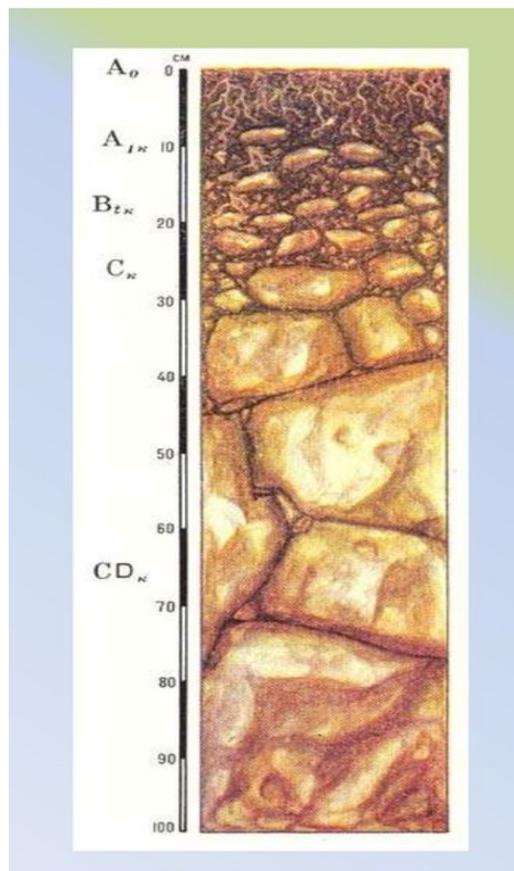


Рисунок 4.11 – Профиль карбонатной дерново-подзолистой почвы.

Климат провинции слабо-континентальный; зима мягкая и умеренно мягкая (от -3 до -10°C), лето умеренно прохладное и умеренно тёплое ($16,4 - 18,6$). Провинция относится к полосе среднеранних культур, основной период вегетации короткий и средней продолжительности ($105 - 140$ суток). Сумма осадков за год $500 - 800$ мм.

Для провинции характерно преобладание дерново-подзолистых суглинистых почв на морене в сочетании с дерново-подзолистыми супесчаными и песчаными почвами на водно-ледниковых отложениях. На северо-западе провинции залегают крупные массивы дерново-карбонатных почв, а на юго-западе встречаются дерново-глеевые и бурые лесные почвы.

Средняя лесистость $41,3\%$, доминируют елово-лиственные леса, на юге с примесью широколиственных пород ($5 - 10\%$) и сосновые на песчаных почвах. Примерно $0,2\%$ общей площади провинции, занимают болота, преимущественно осоково-моховые.

Запасы гумуса в дерново-подзолистых суглинистых почвах в слое $0 - 50$ см колеблются от 50 до 80 т/га; при длительном окультуривании они повышаются до

100 - 110 т/га. В супесчаных и песчаных почвах запасы гумуса в слое 0 - 50 см значительно меньше (30 - 70 т/га). Запасы валового азота в слое 0 - 50 см дерново-подзолистых почв колеблются от 4 до 7 т/га, в зависимости от окультуренности, и снижаются у лёгких дерново-подзолистых почв до 2,5 - 3 т/га.

Средне- и сильнокислые почвы занимают на пашнях около 40 % площади, при этом преобладают среднекислые (рН 4,5 - 5,0). Пашни с нейтральной реакцией приурочены к дерново-карбонатными почвами и занимают около 10 %.

На территории *Среднерусской провинции*, характеризующейся как избыточно влажной и влажной, ниже среднего обеспеченной теплом, с господством дерново-подзолистых почв, расположены; Ивановская, Московская, Кировская и Смоленская исследуемые области. Рельеф – представлен возвышенной равниной чередованием холмистых возвышенностей, равнин и заболоченных низин.

Климат умеренно и средне континентальный, суровость зимы изменяется по территории от умеренно мягкой в западной части до холодной в восточной (от -8 до -16°C). Зима достаточно снежная и многоснежная (мощность снегового покрова 50 - 80 см). Лето – умеренно прохладное и умеренно тёплое (от 17,0 до 19,0°C). Провинция относится к полосе среднеранних культур. Основной период вегетации короткий и средней продолжительности (110 - 140 суток). Сумма осадков за год 500 - 800 мм.

Почвы в основном дерново-подзолистые суглинистые на морене и покровных отложениях. Большие площади заняты также дерново-подзолистыми супесчаными и песчаными почвами, иногда подстилаемыми суглинками на водно-ледниковых и древнеаллювиальных равнинах. Зональные суглинистые почвы занимают более 50 % поверхности провинции, зональные супесчаные – около 35 %. Средняя заболоченность провинции составляет около 10 %. На юге провинции залегают массивы светло-серых лесных почв со вторым гумусовым горизонтом.

Запасы гумуса у дерново-подзолистых суглинистых почв на пашне в слое 0 - 50 см составляют от 60 до 85 т/га, а у супесчаных – от 40 до 60 т/га. В

восточной части провинции запасы гумуса увеличиваются у суглинистых почв до 100 т/га и больше. Запасы валового азота в слое почвы 0 - 50 см, у суглинистых дерново-подзолистых почв 3,5 - 4,5 т/га, у супесчаных до 2,5 - 3,5 т/га. На пашнях преобладают сильнокислые и среднекислые почвы (до 70 %), сильнокислых больше, по сравнению с среднекислыми.

На территории *Вятско-Камской* провинции республики Татарстан подзолистые почвы занимают небольшие площади под хвойными лесами. Город Казань расположена в зоне дерново-подзолистых почв, где залегают средне- и лёгко суглинистые разности. Республика Татарстан расположена на востоке русской равнины и по своему географическому положению относится к районам Поволжья.

На её территории расположилась Казанская исследуемая область. Рельеф представлен типичным эрозийном ландшафтом, расчлененными долинами Волги и Камы на три части: Предволжье, Предкамье и Закамье. Основными формами эрозийного ландшафта являются междуречные плато и долины.

В юго-западной части местами почвообразующими породами служат юрские отложения, представленные карбонатными серыми и тёмно-серыми глинами с прослоями песка. Распространенные в республике Татарстан материнские породы большей частью имеют тяжёлый механический состав.

Климат территории умеренно-континентальный. Зимой преобладают умеренные морозы; сильные морозы наблюдаются редко. Годовое количество осадков составляет 400 - 500 мм.

Наиболее распространенными материнскими породами для дерново-подзолистых почв являются делювиальные, элювиальные и элювно-делювиальные покровные, а также лёссовидные глины и суглинки. Преобладающим типом почв в республике Татарстан являются чернозёмы. Они занимают 41 % площади [4]. Исследуемый район в республике расположен в районе Казани на территории *Среднерусской провинции* дерново-подзолистых почв. Запасы гумуса у дерново-подзолистых суглинистых почв в слое 0 - 50 см составляют от 55 до 80 т/га. Запасы валового азота в слое почвы 0 - 50 см, у суглинистых дерново-подзолистых почв 3,2 - 4,3 т/га.

Б) Суббореальный биоклиматический пояс Центральная лесостепная и степная область

1) Лесостепная зона серых лесных почв, оподзоленных, выщелоченных и типичных чернозёмов, полувлажная, с редкими засухами, ниже среднего обеспеченная теплом.

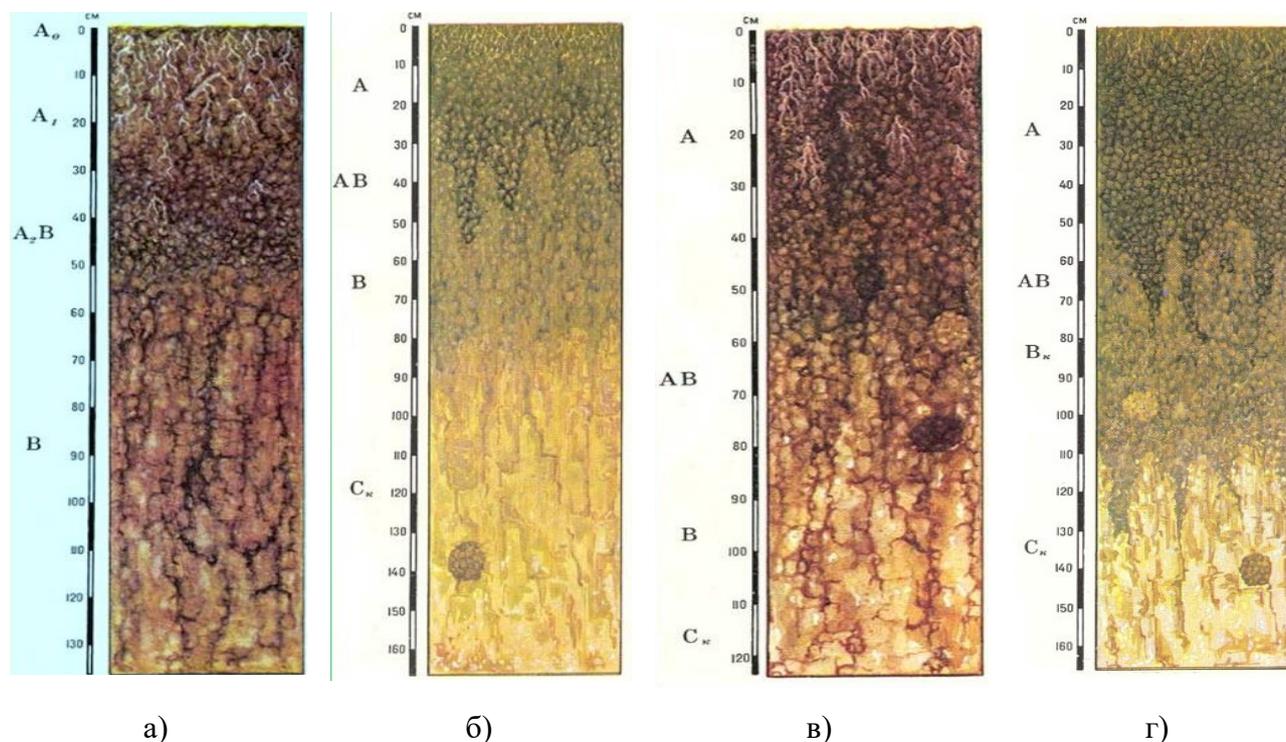


Рисунок 4.12 – Профили почв:

а) – профиль серой лесной почвы; б) – профиль оподзоленного чернозема;
в) – профиль выщелоченного чернозема; г) – профиль типичного чернозема.

Среднерусская провинция, полувлажная и влажная, средне обеспеченная теплом, с преобладанием среднегумусных, тучных мощных чернозёмов и серых лесных почв. Расположена в пределах Среднерусской и Приволжской возвышенностей и Окско-Донской низменности. На её территории, из исследуемых областей, находятся Тульская область. Рельеф – возвышенности с абсолютными высотами 200 - 250 м сильно расчленены долинно-балочной сетью. Равнина Окско-Донской низменности (150 - 180 м) нарушается лишь пологими западинами.

Климат умеренно и средне континентальный, зима умеренно мягкая и умеренно холодная (от -9 до -13°C), умеренно и достаточно снежная (мощность

снегового покрова 35 - 50 см). Лето умеренно тёплое (от 18,2 до 20,4°C). Провинция относится к полосе среднеранних и среднеспелых культур. Сумма осадков за год составляет 400 - 600 мм.

Почвенный покров провинции характеризуется преобладанием выщелоченных и оподзоленных глинистых чернозёмов на лессовидных суглинках. На севере залегают серые лесные суглинистые почвы, чередующиеся с крупными массивами песчаных дерново-подзолистых почв на древнеаллювиальных отложениях. На юге типичные мощные чернозёмы.

На Среднерусской и Приволжской возвышенностях значительные площади смытых почв.

Запасы гумуса в серых лесных суглинистых и тяжелосуглинистых почвах в слое 0 - 50 см составляют 100 - 250 т/га, а в метровом слое 170 - 300 т/га, в оподзоленных, выщелоченных и типичных мощных чернозёмах в слое 0 - 50 см от 250 до 400 т/га, а в метровом слое от 460 до 700 т/га. Запасы валового азота составляют в слое 0 - 50 см у серых лесных почв 6 - 12 т/га и у оподзоленных, выщелоченных и типичных мощных чернозёмов 12 - 22 т/га. В метровом слое запасы валового азота у серых лесных почв 8 - 14 т/га, а у оподзоленных, выщелоченных и типичных чернозёмов 20 - 30 т/га.

Среднекислые почвы с участками сильнокислых занимают до 30%, слабокислые примерно половину площади, нейтральных почв мало.

2) Степная зона обыкновенных и южных чернозёмов, недостаточно обеспеченная влагой, средне и выше среднего обеспеченная теплом.

Климат степной зоны изменяется с запада на восток – зима становится холоднее и продолжительнее, лето жарче, увеличивается континентальность климата. Средняя по зоне продолжительность вегетационного периода составляет 95 - 185 дней. Годовая сумма осадков от 400 - 800 мм до 200 - 400 мм.

Воронежская область расположена в Среднерусской провинции характеризуемой как полувлажной и влажной, средне обеспеченной теплом, с преобладанием среднегумусных, тучных мощных чернозёмов и серых лесных почв, в пределах Среднерусской и Приволжской возвышенностей и Окско-Донской низменности. Рельеф – возвышенности с абсолютными высотами 200 -

250 м сильно расчленены долинно-балочной сетью. Равнина Окско-Донской низменности (150 - 180 м) нарушается лишь пологими западинами.

Климат умеренно и средне континентальный, зима умеренно мягкая и умеренно холодная (от -9 до -13°C), умеренно и достаточно снежная (мощность снегового покрова 35 - 50 см). Лето умеренно тёплое (от 18,2 до 20,4°C). Провинция относится к полосе среднеранних и среднеспелых культур. Сумма осадков за год составляет 400 - 600 мм.

Почвенный покров провинции характеризуется преобладанием выщелоченных и оподзоленных глинистых чернозёмов на лессовидных суглинках. На севере залегают серые лесные суглинистые почвы, чередующиеся с крупными массивами песчаных дерново-подзолистых почв на древнеаллювиальных отложениях. На юге типичные мощные чернозёмы. На Среднерусской и Приволжской возвышенностях значительные площади смытых почв.

Запасы гумуса в серых лесных суглинистых и тяжелосуглинистых почвах в слое 0 - 50 см составляют 100 - 250 т/га, а в метровом слое - 170 - 300 т/га, в оподзоленных, выщелоченных и типичных мощных чернозёмах в слое 0 - 50 см от 250 до 400 т/га, а в метровом слое от 460 до 700 т/га. Запасы валового азота составляют в слое 0 - 50 см у серых лесных почв 6 - 12 т/га и у оподзоленных, выщелоченных и типичных мощных чернозёмов 12 - 22 т/га. В метровом слое запасы валового азота у серых лесных почв 8 - 14 т/га, а у оподзоленных, выщелоченных и типичных чернозёмов 20 - 30 т/га.

Среднерусская степная провинция, полузасушливая и засушливая, средне и выше среднего обеспеченная теплом, с преобладанием среднеспелых чернозёмов. В провинцию входят северо-западная часть Саратовской, Ростовской исследуемых областей.

Рельеф представлен повышенной равниной с высотами 200 - 300 м, местами сильно расчленённая долинно-балочной сетью. По крутым и высоким склонам речных долин развиты овраги.

Климат умеренно и средне континентальный – зима умеренно мягкая и умеренно холодная с температурами от -5 до - 12°C, мощность снегового

покрова 15 - 40 см. Лето тёплое с температурой 20 - 22,2°C. Период вегетации составляет 160 - 180 суток. Сумма осадков за год составляет 350 - 500 мм.

Почвы представлены обыкновенными и южными чернозёмами средней и местами повышенной мощности.

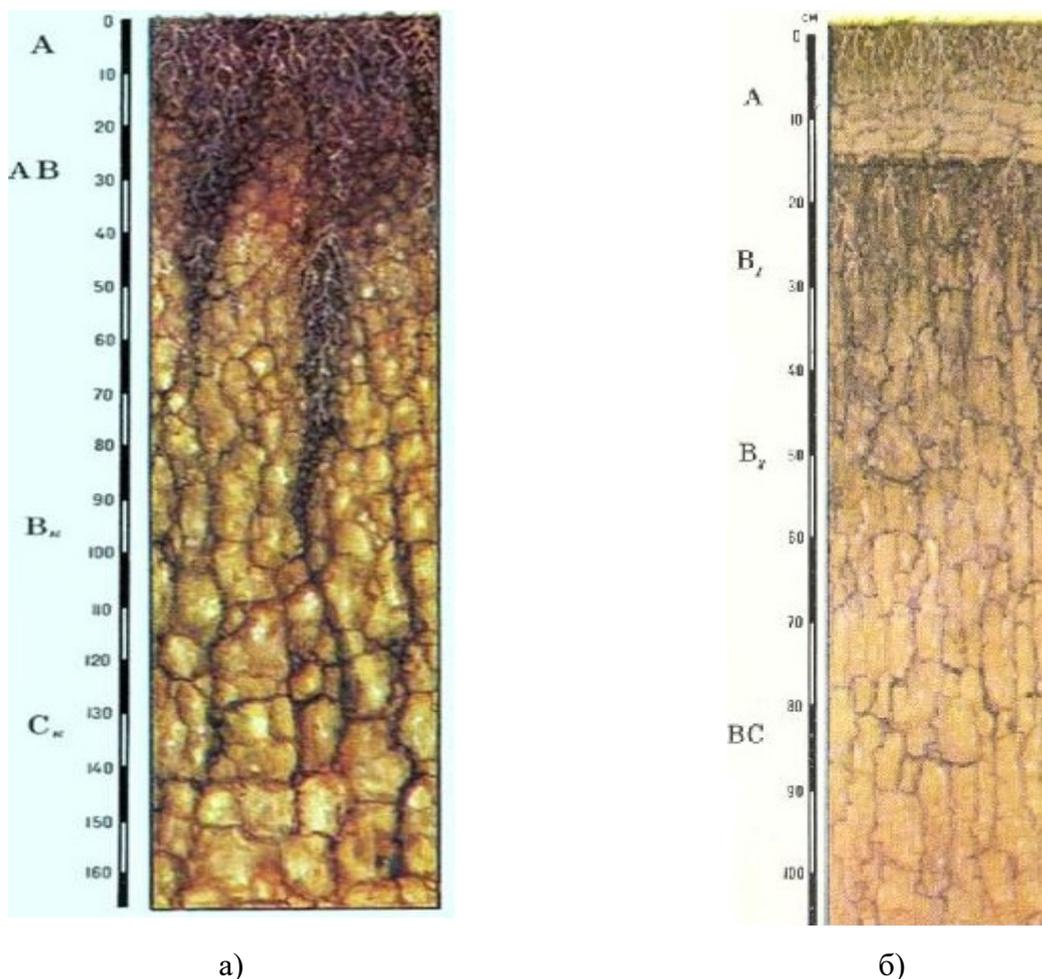


Рисунок 4.16 – Профили почв Среднерусской провинции:

а) – профиль южного чернозема; б) – профиль солонцеватого чернозема.

Запасы гумуса и валового азота такие же, как и в чернозёмах Воронежской области.

Заволжская степная провинция, засушливая, средне обеспеченная теплом, с преобладанием среднемощных, местами солонцеватых чернозёмов. На её территории расположена большая часть Оренбургской области.

Рельеф – левобережная приволжская полоса провинции представляет собой низкую слабоволнистую равнину древних волжских террас, центральная часть охватывает плоско увалистое сильно расчлененное балочной сетью

«сыртовое» плато, в восточной части расположено густо расчлененное Предуральское плато.

Климат средне континентальный – зима умеренно холодная и холодная с температурами $-12 - -16^{\circ}\text{C}$, умеренно и достаточно снежная мощность снегового покрова 30 - 50 см. Лето умеренно тёплое и тёплое с температурами $19,2 - 21,5^{\circ}\text{C}$. Продолжительность вегетации составляет 140 - 160 суток. Сумма осадков за год составляет 300 - 400 мм.

Почвы представлены: среднemocными, обыкновенными и южными чернозёмами, местами солонцеватыми. В северной части провинции преобладают обыкновенные чернозёмы, с массивами типичных у северной границы, южная, большая по площади часть провинции, характеризуется широким распространением южных чернозёмов на склонах сыртового рельефа, с небольшими массивами обыкновенных чернозёмов на ровных высоких поверхностях сыртов с тёмно-каштановыми почвами в долинах. Почвы формируются в основном на сыртовых глинах. В чернозёмах содержание гумуса в слое 0 -100 см, составляет 400 - 650 т/га. Содержание валового азота в метровом слое – 20 -30 т/га.

Пустынно-степная и пустынная область

1) Пустынно-степная зона светло-каштановых и бурых почв. *Прикаспийская провинция*, полусухая и сухая, выше среднего и повышено обеспеченная теплом, с господством светло-каштановых, бурых почв, с широким распространением лугово-солонцеватых комплексов. На территории провинции расположены; южная часть Волгоградской исследуемой области.

Рельеф равнинный, по западной и восточной окраинам с возвышенностями. Широко распространены плоские депрессии, занятые лиманами, солончаками. Значительные площади песков.

Климат средне и очень континентальный – зима умеренно мягкая и умеренно холодная с температурами от -5 до -15°C , малоснежная с мощностью снегового покрова 10 - 25 см. Лето – очень тёплое и умеренно жаркое с температурами $22,5 - 25,8^{\circ}\text{C}$. Период вегетации составляет 150 - 175 суток. Сумма осадков за год составляет 150 - 250 мм.

Запасы гумуса в светло-каштановых почвах в слое 0 -50 см колеблются в пределах 60 - 70 т/га. Содержание валового азота в слое 0 - 50 см составляет 4,8 -8 т/га.

Центральная лесостепная и степная область

1) Степная зона обыкновенных и южных чернозёмов. *Приазовско-Предкавказская* степная провинция, полузасушливая и полувлажная выше среднего и повышено обеспеченная теплом, с господством мощных и мицелярно-карбонатных чернозёмов. На территории провинции расположены следующие исследуемые области: большая часть Краснодарского и Ставропольского краёв, западная часть Ростовской области.

Климат зоны умеренно и средне континентальный – зима мягкая и умеренно мягкая с температурами от 0 до -7°C, мощность снегового покрова 10 - 60 см, лето тёплое (20,6 - 23,2°C). Количество осадков за год составляет 400 - 800 мм. Продолжительность вегетационного периода 170 - 185 суток.

В почвенном покрове преобладают сверхмощные и мощные мицелярно-карбонатные чернозёмы (предкавказские и приазовские), которые различаются на выщелоченные, типичные, обыкновенные и южные подтипы. Сверхмощные типичные и выщелоченные предкавказские чернозёмы занимают большие площади в Краснодарском крае, в южной предгорной части провинции. Для центральной части провинции характерны обыкновенные мощные предкавказские и приазовские чернозёмы [1].

Запасы гумуса в чернозёмных почвах для слоя 0 - 50 см составляют 220 - 340 т/га, а для слоя 0 - 100 см – 300-500 т/га. Содержание валового азота в слое 0-50 см составляет 12-15 т/га и соответственно 22-27 т/га для слоя 0-100 см.

Почвенно-географическое расположение исследуемых областей представлены в таблице 4.1.

Виды исследуемых почв представлены в таблице 4.2, а водно-физические свойства в таблице 4.3 [3, 4, 5, 6, 11, 36, 70, 117, 118, 119, 120].

Таблица – 4.1 Почвенно-географическое расположение исследуемых областей.

Областной центр	Биоклиматический пояс	Биоклиматическая область	Почвенная зона, подзона	Почвенная провинция
Ленинград	Бореальный	Центральная таёжно-лесная	Южно-таежная зона дерн.-подзол. почв	Прибалтийская
Киров	Бореальный	Центральная таёжно-лесная	Южно-таежная зона дерн.-подзол. почв	Среднерусская
Иванов	Бореальный	Центральная таёжно-лесная	Южно-таежная зона дерн.-подзол. почв	Среднерусская
Казань	Бореальный	Центральная таёжно-лесная	Южно-таежная зона дерн.-подзол. почв	Вятско-Камская
Москва	Бореальный	Центральная таёжно-лесная	Южно-таежная зона дерн.-подзол. почв	Среднерусская
Смоленск	Бореальный	Центральная таёжно-лесная	Южно-таежная зона дерн.-подзол	Среднерусская
Тула	Суббореальный	Центральная лесостепная и степная	Лесостеп. зона серых лесных почв, выщелоч. и типичн. чернозёмов	Среднерусская
Воронеж	Суббореальный	Центральная лесостепная и степная	Степная зона обыкнов. и южных чернозёмов	Среднерусская степная
Саратов	Суббореальный	Центральная лесостепная и степная	Степная зона обыкнов. и южных чернозёмов	Среднерусская степная
Оренбург	Суббореальный	Центральная лесостепная и степная	Степная зона обыкнов. и южных чернозёмов	Заволжская степная
Волгоград	Суббореальный	Пустынно-степная и пустынная область	Пустынно-степная зона светло-каштановых и бурых почв.	Прикаспийская
Ростов-на-Дону	Суббореальный	Центральная лесостепная и степная	Степная зона обыкнов. и южных чернозёмов	Приазовско-Предкавказская степная.
Краснодар	Суббореальный	Центральная лесостепная и степная	Степная зона обыкнов. и южных чернозёмов	Приазовско-Предкавказская степная
Ставрополь	Суббореальный	Центральная лесостепная и степная	Степная зона обыкнов. и южных чернозёмов	Приазовско-Предкавказская степная

Таблица – 4.2 Почвенные условия.

№ п/п	Административное районирование	Тип почвы	Подстилающие породы
1	Ленинградская область	Дерново-среднеподзолистая лёгкосуглинистая	Моренный суглинок
2	Кировская область	Дерново-подзолистая суглинистая	Покровный суглинок
3	Ивановская область	Дерново-среднеподзолистая легосуглинистая	Моренный суглинок
4	Московская область	Дерново-среднеподзолистая тяжелосуглинистая	Покровный суглинок
5	Казанская область	Дерново-подзолистая супесчаная	Тяжёлый суглинок
6	Смоленская область	Дерново-среднеподзолистая легкосуглинистая	Покровный суглинок
7	Тульская область	Чернозём сильно выщелоченный тяжелосуглинистый	Карбонатно-лёссовидный суглинок
8	Воронежская область	Мощные типичные чернозёмы	Суглинок
9	Саратовская область	Обыкновенный глинистый чернозём	Сыртовая глина
10	Оренбургская область	Чернозём обыкновенный тучный глинистый	Глина
11	Волгоградская область	Светло-каштановые суглинистые	Суглинок
12	Ростовская область	Североприазовские чернозёмы	Бурый тяжёлый суглинок
13	Краснодарский край	Чернозём предкавказский карбонатный малагумусный мощный	Лёссовидный суглинок
14	Ставропольский край	Предкавказские среднегумусные карбонатные чернозёмы	Лёссовидные суглинки

Таблица – 4.3 Водно-физические свойства почв.

№ п/п	Генетические горизонты	Мощность, см	Объемный вес, г/см ³	Удельный вес, г/см ³	Максимальная гигроскопичность, % к сухой почве	Полевая влагоёмкость, % к сухой почве
	1	2	3	4	5	6

Продолжение таблицы 4.3

	1	2	3	4	5	6
1	A _н	10	1,11	2,55	2,1	38,6
	A ₂	30	1,34	2,63	2,0	22,9
	A ₂ B	45	1,34	2,63	3,4	21,2
	B ₂	60	1,47	2,7	4,4	34,7
	BC	100	1,52	2,73	4,2	29,1
2	A _н	15	1,3	2,64	4,0	39,1
	A ₂	20	1,56	2,69	3,4	26,9
	A ₂ B	35	1,56	2,70	4,6	27,0
	B	55	1,70	2,72	6,3	22,1
	C	100	1,73	2,74	5,8	21,3
3	A _н	16	1,17	2,54	1,9	28,8
	A ₂	25	1,43	2,64	0,9	24,9
	A ₂ B	44	1,43	2,64	4,2	24,7
	B	65	1,51	2,67	5,4	20,1
	C	100	1,51	2,55	3,8	20,6
4	A _н	15	1,33	2,61	3,1	36,4
	A ₂ B	27	1,58	2,65	2,7	24,2
	B ₁	38	1,63	2,68	4,5	24,0
	B ₂	57	1,60	2,72	6,5	25,7
	B ₃	92	1,64	2,70	6,6	25,0
	C	150	1,71	2,68	5,0	21,0
5	A ₁	17	1,35	2,65	2,9	23,3
	A ₂	20	1,39	2,65	1,3	18,0
	B ₁	45	1,52	2,67	4,1	20,0
	B ₂	75	1,43	2,68	6,1	21,0
	B ₃	95	1,41	2,73	6,1	23,0
	C	115	1,4	2,73	6,1	23,2
6	A _н	6	1,10	2,63	2,7	28,8
	A ₁	17	1,42	2,61	4,2	24,9
	A ₂	25	1,47	2,63	3,1	24,7
	B ₁	45	1,46	2,69	9,7	20,1
	B ₂	111	1,55	2,70	7,8	20,6
	C	137	1,54	2,70	8,1	20,0
7	A _н	20	1,1	2,6	9,4	37,4
	A ₁	30	1,23	2,7	10,0	32,8
	B ₁	30	1,23	2,7	9,1	30,5
	B ₂	20	1,23	2,7	8,6	25,9
	C	500	1,4	2,7	8,4	23,1
8	A	50	1,1	2,5	11	37
	B ₁	30	1,2	2,56	10	32,4
	B ₂	20	1,35	2,64	9	28,2
	C	200	1,4	2,70	8	23,8
9	A	28	1,10	2,55	10,6	37,2
	B ₁	24	1,30	2,60	10,0	31,6
	B ₂	35	1,41	2,68	9,5	25,1
	C	13	1,52	2,72	9,2	23,5

Продолжение таблицы 4.3

	1	2	3	4	5	6
10	A _п	28	1,03	2,58	14,6	40,6
	A	25	1,09	2,62	14,0	39,0
	B ₁	35	1,19	2,65	14,1	33,2
	B ₂	47	1,13	2,72	12,0	31,7
	B ₃	76	1,39	2,76	9,5	29,1
	C	114	1,51	2,79	9,2	28,2
11	A	20	1,40	2,57	4,6	26,1
	B ₁	18	1,53	2,67	6,1	24,8
	B ₂	39	1,69	2,75	6,3	18,9
	C	25	1,61	2,73	6,4	16,7
12	A ₁	27	1,03	2,67	11,9	39,7
	A ₂	33	1,22	2,68	12,3	35,5
	B ₁	35	1,28	2,71	12,3	32,7
	B ₂	28	1,42	2,73	10,7	27,2
	BC	25	1,38	2,75	10,4	29,3
	C	22	—	—	—	—
13	A _п	27	1,18	2,68	12,1	33,1
	A ₁	35	1,23	2,69	12,2	30,4
	B ₁	36	1,26	2,71	12,3	27,5
	B ₂	28	1,37	2,72	10,8	25,1
	B _c	20	1,4	2,73	10,6	24,0
	C	—	1,42	2,75	10,4	22,9
14	A _п	27	1,18	2,68	12,1	33,1
	A ₁	23	1,23	2,69	12,2	30,4
	B ₁	22	1,26	2,71	12,3	27,5
	B ₂	24	1,37	2,72	10,8	25,1
	B _c	17	1,42	2,75	10,4	22,9
	C	—	1,53	2,72	10,4	20,5

Примечание: нумерация в первом столбце соответствует нумерации областей в таблице 4.2.

4.2. Культуры, выращиваемые на полях, при утилизации сточных вод животноводческих комплексов

В качестве культур, выращиваемых на полях орошения сточными водами, были выбраны многолетние травы, так как они являются наиболее отзывчивыми на сточные воды и обеспечивают наибольший вынос азота с урожаем до 58% от общего его поступления со стоками [96]. Коэффициент использования многолетними травами азота составляет 40 - 60% [54].

Известно, что неограниченное поступление азота в растения ведёт к тому, что он не успевает перерабатываться в сложные органические вещества и в

результате накапливается в виде нитратов, а также меняется соотношение веществ в растениях [92, 95, 103, 148].

Критический уровень нитратов в сухой массе трав в пересчёте на N - NO₃ составляет 0,07 - 0,2% (700 - 2000 мг/кг) [53, 140].

Отмечено, что наибольшей способностью накапливать повышенное содержание нитратов на фоне высоких доз азотных удобрений обладает кострец безостый и двукисточник тростниковый. Уровень накопления нитратного азота в травах во многом зависит от агроклиматических факторов [72].

Однако в монографии многолетние травы рассматриваются как биогеохимический барьер задерживающий проникновение азотных соединений в грунтовые воды и предотвращающий их загрязнение. Таким образом, в расчётах не учитывалось предельно допустимое содержание нитратов в растениях, а следовательно и возможность их использования в качестве кормов.

В таблице 4.4 представлены данные по содержанию элементов в злаковых травах [136], а в таблице 4.5 состав травосмесей, потенциальная урожайность и вынос азота с урожаем в зависимости от расположения расчётных областей по данным исследований проводимых учёными Тимирязевской академии.

Таблица – 4.4 Содержание азота, фосфора и калия в траве и вынос питательных элементов с урожаем интенсивно удобряемых злаковых пастбищ.

Пастбище	Удобрение (кг/га)	Урожай (в ц/га)		Содержание (в %)			Вынос (в кг/га)		
		зелёная масса	воздуш- но-сухая масса	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Из ежи- сборной	N ₁₈₀ P ₁₀₀ K ₁₈₀	455	85	3,1	0,6	4,2	261	52	359
	N ₃₀₀ P ₁₀₀ K ₃₀₀	552	98	3,8	0,5	3,8	374	51	372
Чисто злаковое с тимофеевкой и овсяницей луговой	N ₁₈₀ P ₆₀ K ₈₀	320	69	2,5	0,7	2,9	176	46	198
	N ₃₀₀ P ₉₀ K ₁₈₀	438	86	3,1	0,7	3,7	269	58	316
Злаковое разнотравье восьмого года пользования	N ₁₈₀ P ₆₀ P ₆₀	261	55	3,5	0,7	2,7	190	39	149

Таблица – 4.5. Состав травосмесей, урожайность и вынос азота с урожаем по областям.

Область	Состав травосмеси	Урожайность, т/га сухого вещества	Вынос азота с урожаем, кг/га
Ленинградская	тимофеевка луговая + овсяница тростниковая	6 - 8	180 - 304
Киров	—	7 - 9	210 - 340
Иванов	—	7 - 9	210 - 340
Казань	тимофеевка луговая + кострец безостый	9 - 10	300 - 380
Москва	—	9 - 10	300 - 380
Смоленск	—	9 - 10	300 - 380
Тула	кострец безостый + овсяница луговая	10 - 11	310 - 420
Оренбург	—	11 - 12	341 - 460
Саратов	—	11 - 13	340 - 500
Воронеж	—	13 - 14	400 - 540
Волгоград	кострец безостый + овсяница луговая	11 - 13	340 - 500
Ростов-на-Дону	—	11 - 13	340 - 500
Краснодарский край	—	15 - 17	465 - 650
Ставропольский край	—	14 - 16	434 - 608

Таким образом, предложены сценарии утилизации животноводческих стоков в областях, в которых экологически безопасное функционирование животноводческих комплексов наиболее актуально в связи с интенсивно развитым животноводством по сравнению с другими.

Глава 5. Моделирование передвижения азота в почве и подстилающих грунтах при утилизации животноводческих стоков на полях орошения

5.1. Общая реализация математической модели

Перечисленные выше модели реализованы в виде программы для ЭВМ, что позволяет быстро и с достаточной степенью точности производить расчёты на основании которых осуществлять прогнозы по экологической обстановке при утилизации сточных вод животноводческих комплексов. Так же возможно достаточно оперативно работать с большим количеством информации.

Программа позволяет просчитать не только один реальный год при известном графике выпадения атмосферных осадков, динамике потенциального суммарного испарения и прочих известных параметров, но производить расчёты целого ряда реальных лет с оригинальными метеорологическими данными за вегетационный период.

Расчёт ряда лет происходит в непрерывном режиме, то есть с учётом перехода конечных эпюр содержания азота в начальные для следующего года. В работе расчёты производились по двадцати летним рядам наблюдений. При этом принималось, что за пределами вегетационного периода атмосферные осадки в почву не попадают, а аккумулируются на поверхности почвы в виде снега, который весной тает, вода частично стекает по поверхности, остальная впитывается в почву, увлажняя верхний метровый слой примерно до 0,85...0,90 ППВ. В этот же холодный период прекращается испарение. Потоки влаги в почве затухают.

В это время прекращаются отбор азота растениями, процессы нитрификации и денитрификации. Вместе с тем, в глубоких, непромерзающих слоях наблюдается перемещение азота, хотя и медленное.

Расчёт следующих лет идёт непрерывно, в начале каждого следующего года автоматически увеличивается влажность почвы, пересчитываются концентрации азота и принимаются в качестве начальных.

5.2. Водный режим областей

Для математического моделирования были выбраны четырнадцать различных между собой почвенно-географических областей на территории РФ.

Расчёты производились при трёх различных вариантах водного режима и глубоком залегании уровня грунтовых вод, а именно;

— *В первом варианте* рассматривался, естественный режим водного питания без орошения сточными водами животноводческих комплексов.

— *Во втором варианте* производились поливы дождеванием сточными водами назначаемые в автоматическом режиме при достижении влажности почвы нижнего уровня регулирования. Также в этом варианте программа автоматически определяла необходимые оросительные нормы и сроки поливов, в зависимости от влажности почвы и с учётом ежедневных метеорологических условий за двадцати лет по всем областям. Величины поливных норм задавалась отдельно.

— *В третьем варианте* поливы сточными водами животноводческих комплексов производились по жёсткому графику, то есть сроки поливов назначались через равные промежутки времени в ручном режиме без учёта сроков выпадения осадков и влажности почвы на момент увлажнения. Значения оросительных норм брались из второго варианта.

Данные по водному режиму областей приведены в виде среднесноголетних результатов за 20 лет в таблицах «Водный режим», отдельно по каждой области. Расчёты проводились с стабилизационным периодом равным двадцати годам предшествующем основному, и необходимым для насыщения расчётных слоёв влагой и стабилизацией водного режима, что дало наибольшее приближение к реальным условиям. Полученные результаты по естественному сбросу влаги в грунтовые воды при первом варианте расчёта и данные других исследователей [58, 59, 60] по данным областям приведены в таблице 5.1.

Таблица – 5.1 Сравнение расчетных данных, по сбросу влаги в грунтовые воды, с данными других источников.

№ п/п	Областной центр	Сброс расчётный, мм.	Сброс по данным других источников, мм.
1	Санкт-Петербург	110,6	95 - 135
2	Киров	62,3	69,1 - 110,5
3	Иваново	85,6	90 - 156
4	Казань	47,1	10 - 45,8
5	Москва	142,4	90 - 156
6	Смоленск	131,2	90 - 156
7	Тула	57,1	13,9 - 57,8
8	Оренбург	4	4,3 - 40,7
9	Саратов	19,5	10 - 35,5
10	Воронеж	7,2	10 - 35,5
11	Волгоград	3,3	3,5 - 19,9
12	Ростов-на-Дону	5,8	3,5 - 19,9
13	Краснодар	8,6	3,1 - 14,6
14	Ставрополь	7	3,1 - 14,6

Из данной таблицы видно, что расчетные данные по условиям без поливов сточными водами соответствуют результатам других работ практически по всем исследуемым областям, следовательно, можно сделать вывод о правильности моделирования водного режима.

Сброс влаги в грунтовые воды (промываемость почвы) значительно увеличивается под влиянием поливов сточными водами, что видно из таблицы 5.2- 5.16. Причём сбросы по второму варианту, поливы по влажности почвы, меньше чем по третьему, поливы по жёсткому графику, несмотря на то, что оросительные нормы одинаковы. Это эффект объясняется совпадением поливов сточными водами с выпадением осадков или близким расположением во времени, что приводит к росту коэффициента влагопроводности (формула (2.2)) за счёт увеличения объёмной влажности, рост значения полного напора почвенной влаги (формула (2.3)), и как следствие увеличение объёмного

вертикального потока влаги (формула (2.1)). Таким образом, максимальная промываемость почв наблюдается в третьем варианте.

Урожайность культур оценивалась по обеспеченности их влагой на протяжении всего вегетационного периода, и приведена в таблицах 5.3-5.16 в долях от потенциальной. При сравнении результатов по трём вариантам водного режима видно, что при естественных условиях урожай наименьший, как результат нехватки осадков и их неоптимального распределения во времени для выращиваемых культур. Наибольшая урожайность наблюдается при поливах, назначаемых по влажности почвы, что связано с достаточной обеспеченностью влагой и в нужные сроки, и оптимального распределения её для растений. При поливах сточными водами животноводческих комплексов по жёсткому графику происходит снижение урожайности культур, по сравнению с поливами по влажности почвы по двум основным причинам: переувлажнение почвенного слоя в межполивные периоды, снижение влажности почвы ниже допустимых пределов за этот же промежуток времени, что происходит так же из-за естественной неравномерности выпадения осадков.

Значения оросительных норм сточных вод животноводческих комплексов внутри двадцати летнего ряда, по второму варианту, значительно колебалось в зависимости от конкретных климатических условий каждого года в отдельности, и изменялась по областям (таблица 5.2).

Таблица – 5.2 Предел изменения оросительных норм сточных вод животноводческих комплексов, при втором варианте расчёта, внутри наблюдаемых рядов.

№ п/п	Областной центр	Оросительная норма в наиболее влажный год, мм	Оросительная норма в наиболее засушливый год, мм
	1	2	3
1	Санкт-Петербург	0	120
2	Киров	120	450
3	Иваново	60	570
4	Казань	35	595
5	Москва	60	360

	1	2	3
6	Смоленск	30	270
7	Тула	0	480
8	Оренбург	358	1024
9	Саратов	90	855
10	Воронеж	120	840
11	Волгоград	405	1215
12	Ростов-на-Дону	300	780
13	Краснодар	165	660
14	Ставрополь	165	660

Таким образом, поливы сточными водами по влажности почвы обеспечивают оптимальный водный режим, по сравнению с поливами по жёсткому графику, и наибольшую урожайность выращиваемых культур, но являются технически более сложными из-за больших колебаний оросительных норм и большой неравномерности распределения поливов сточными водами.

Таблица – 5.3 Среднегодовое водное хозяйство Ленинградской области.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
1	—	—	—	110,6	106	335,1	282,1	0,794
2	по вл.	30	64	133,3	133,4	—	316,1	0,836
3	жесткий	30	62	145,2	145	—	301,6	0,786

Таблица – 5.4 Среднегодовое водное хозяйство Кировской области.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
1	—	—	—	62,3	63,4	291,2	279,1	0,609
2	по вл.	30	264	174	174	—	431,2	0,983
3	жесткий	30	277	219,1	219,1	—	399,3	0,907

Таблица – 5.5 Среднегодовое водное хозяйство Ивановской области.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
1	—	—	—	85,6	88,7	281,3	240,2	0,658
2	по вл.	30	286	235,6	244,2	—	369,8	0,966
3	жесткий	30	277	264,9	264,7	—	341,6	0,868

Таблица – 5.6 Среднегодовое водное хозяйство Казани.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
1	—	—	—	47,1	47,25	303	306,2	0,607
2	по вл.	35	293	146,9	146,8	—	499	0,973
3	жесткий	35	289	191,6	191,7	—	448	0,890

Таблица – 5.7 Среднегодовое водное хозяйство Московской области.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
1	—	—	—	142,4	142,5	351	258,6	0,801
2	по вл.	30	171	244,5	244,4	—	328,4	0,951
3	жесткий	30	185	280,5	280,6	—	305,5	0,885

Таблица – 5.8 Среднегодовое водное хозяйство Смоленской области.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
1	—	—	—	131,2	131,2	372	290	0,860
2	по вл.	30	120	207,2	207,4	—	333,3	0,937
3	жесткий	30	120	227,5	227,5	—	317,6	0,892

Таблица – 5.9 Среднегодовое водное хозяйство Тульской области.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
1	—	—	—	57,1	57,05	387,5	380	0,776
2	по вл.	40	160	121,1	121	—	476,4	0,979
3	жесткий	40	160	162,4	162,5	—	440	0,897

Таблица – 5.10 Среднегодовое водное хозяйство Оренбургской области.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
1	—	—	—	4	4,4	227	273	0,286
2	по вл.	50	514	66,3	66,2	—	696	0,934
3	жесткий	50	500	121,7	121,8	—	662,8	0,87

Таблица – 5.11 Среднегодовое водное хозяйство Саратовской области.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
		мм	мм	мм	мм	мм	мм	в долях
1	—	—	—	19,5	19,4	306,75	337,15	0,485
2	по вл.	45	360	82,25	82	—	661,1	0,963
3	жесткий	45	500	121,7	121,8	—	566,8	0,815

Таблица – 5.12 Среднегодовое водное хозяйство Воронежской области.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
1	—	—	—	7,2	7,4	303,2	345,35	0,44
2	по вл.	60	420	123,5	123,5	—	669,3	0,982
3	жесткий	60	420	172,6	174,3	—	605	0,885

Таблица – 5.13 Среднегодовое водное хозяйство Волгоградской области.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
1	—	—	—	3,2	3,3	212	258	0,248
2	по вл.	45	720	26,6	26,7	—	992,5	0,914
3	жесткий	45	720	132,3	132,4	—	857,1	0,727

Таблица – 5.14 Среднегодовое водное хозяйство Ростовской области.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
1	—	—	—	5,8	5,7	335,2	378,9	0,379
2	по вл.	60	540	111,3	111,4	—	809,1	1
3	жесткий	60	540	132,3	132,4	—	741,7	0,91

Таблица – 5.15 Среднегодовое водный режим Краснодар.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
1	—	—	—	8,6	8,7	372,3	410,6	0,435
2	по вл.	55	440	98,2	98,2	—	763,9	0,972
3	жесткий	55	440	153,3	153,4	—	713,1	0,872

Таблица – 5.16 Среднегодовое водный режим Ставрополя.

№ п/п	Вид графика полива	Поливные нормы, мм	Оросительные нормы, мм	Сброс в ГВ, мм	Влагообмен, мм	Осадки, мм	Испаряемость, мм	Урожай, в долях
1	—	—	—	7	7,2	368,9	411,3	0,474
2	по вл.	55	385	78,4	78,4	—	724,9	0,967
3	жесткий	55	385	138,8	138,9	—	669,1	0,852

5.3. Определение безопасных концентраций азотных соединений, в сточных водах животноводческих комплексов с применением цифровых технологий

Азотный режим исследуемых областей, при утилизации сточных вод животноводческих комплексов орошением на сельскохозяйственных полях, моделировался из условия не загрязнения грунтовых вод, что обеспечивало бы их экологически безопасное функционирование. Исходя из нормативов, в сбросах влаги в грунтовые воды содержание нитратов, как наиболее опасного азотного соединения, не должно превышать 10 мг/л по чистому азоту.

Расчёты производились по нескольким вариантам:

— В первом варианте оценивались естественные условия, без внесения удобрений и поливов сточными водами, с целью выявления естественного фона по нитратам (соответствует первому варианту в разделе 5.1).

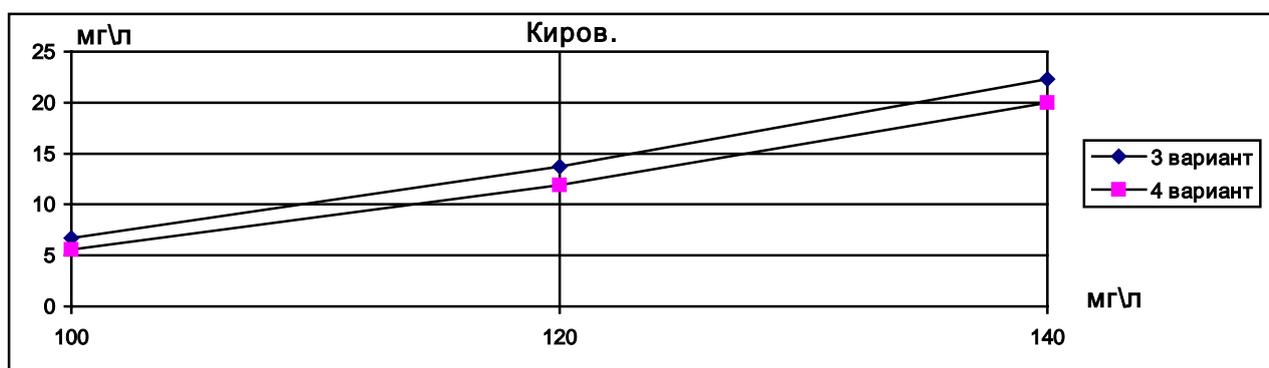
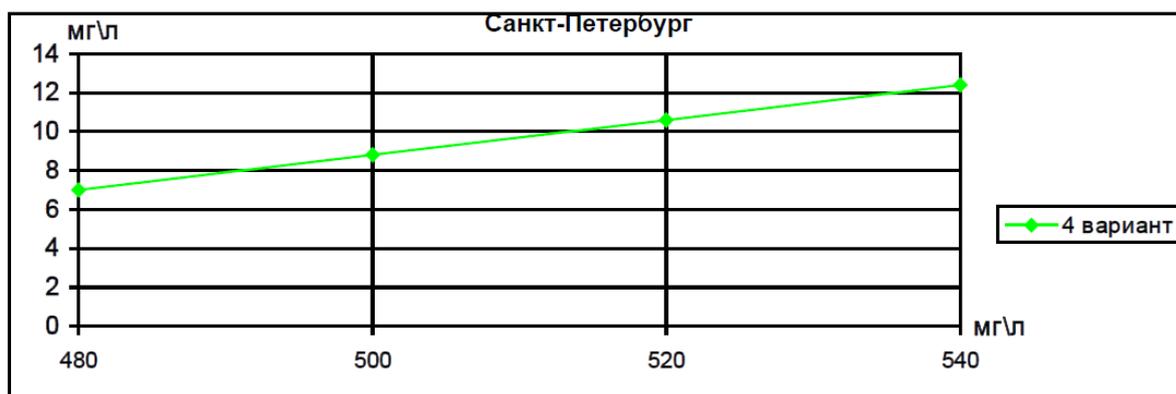
— Во втором варианте вносились азотные удобрения в дозе 160 кг/га во всех областях, без орошения как сточными водами животноводческих комплексов, так и пресными водами, для оценки существующей агротехники возделывания сельскохозяйственных культур без искусственного увлажнения, с

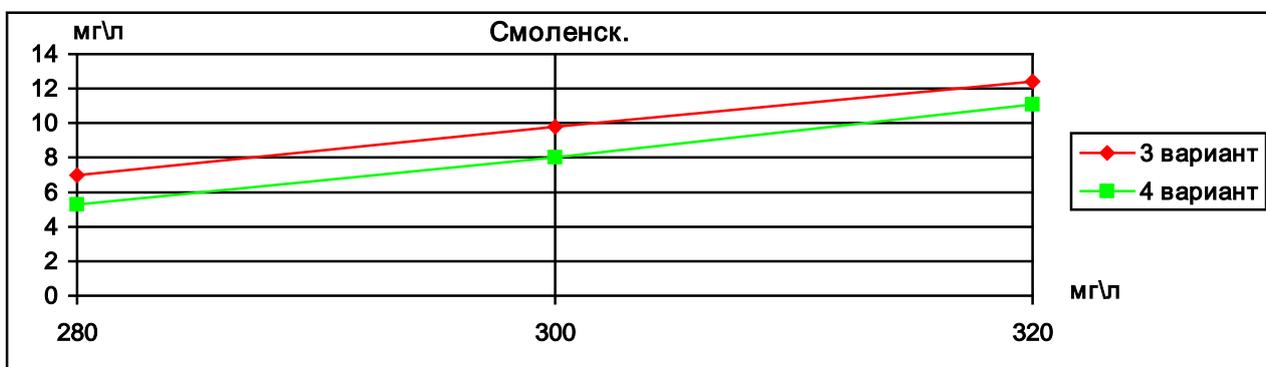
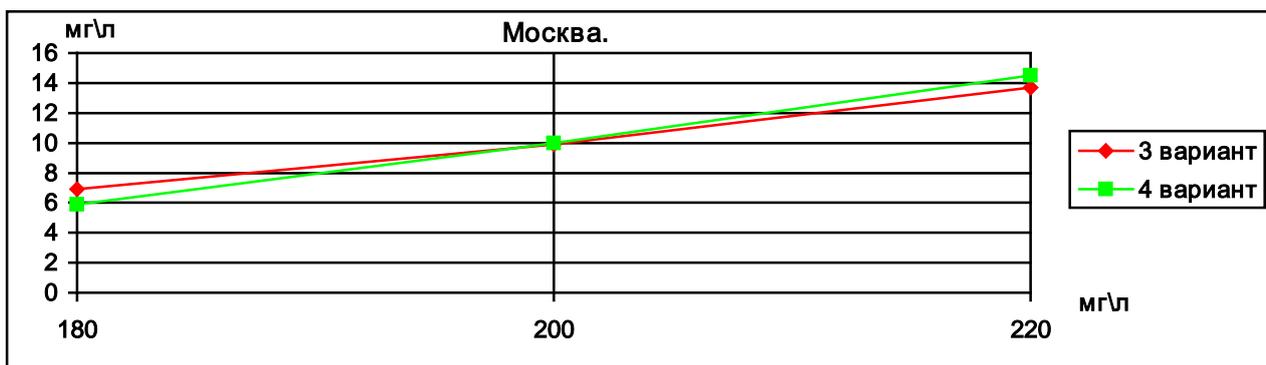
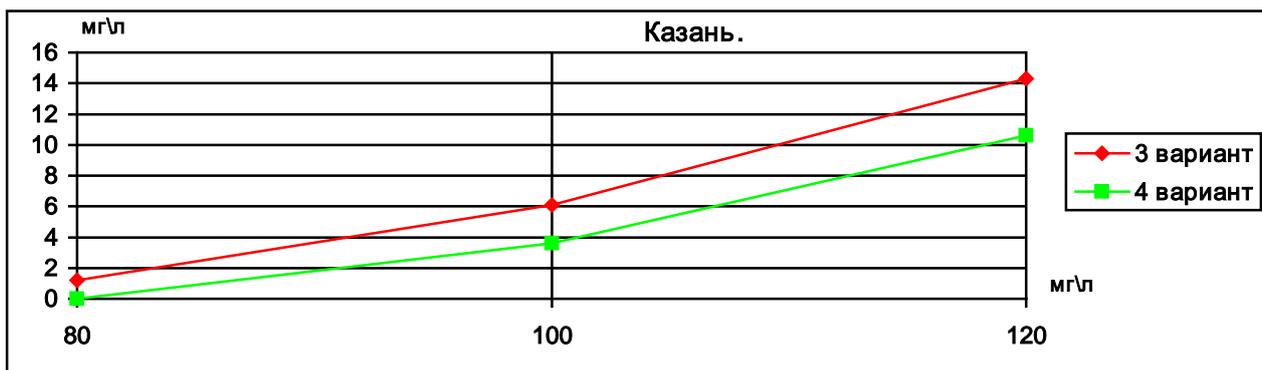
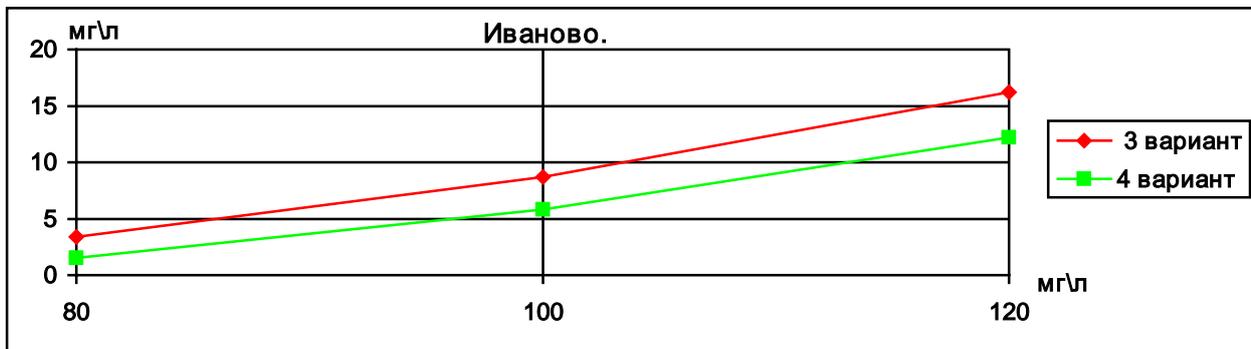
точки зрения экологической безопасности (соответствует первому варианту в разделе 5.1).

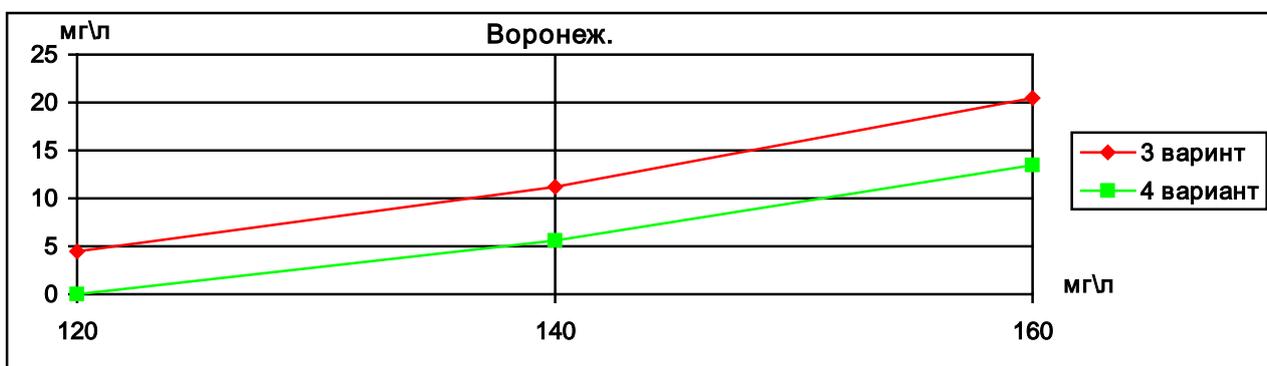
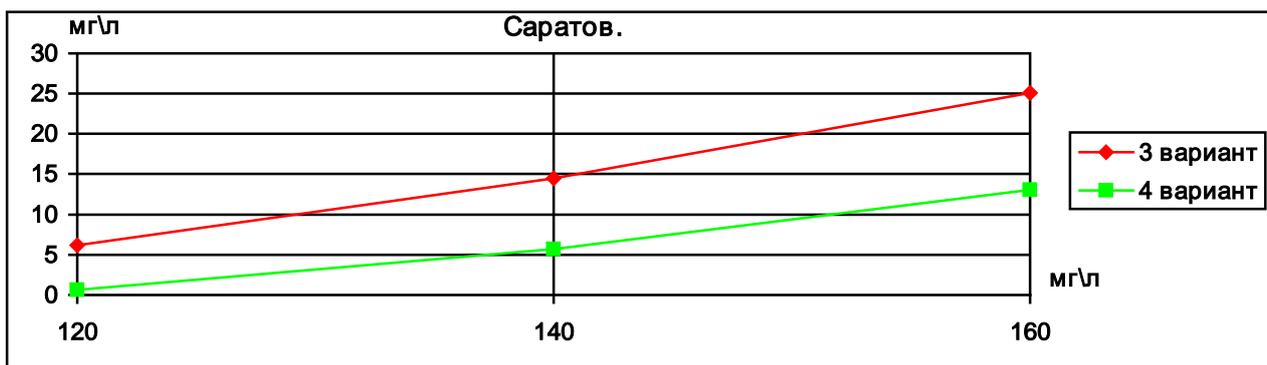
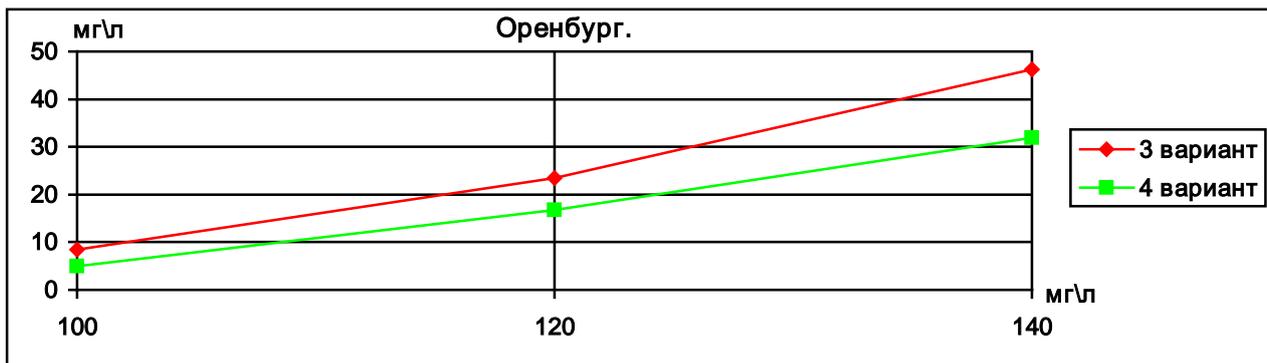
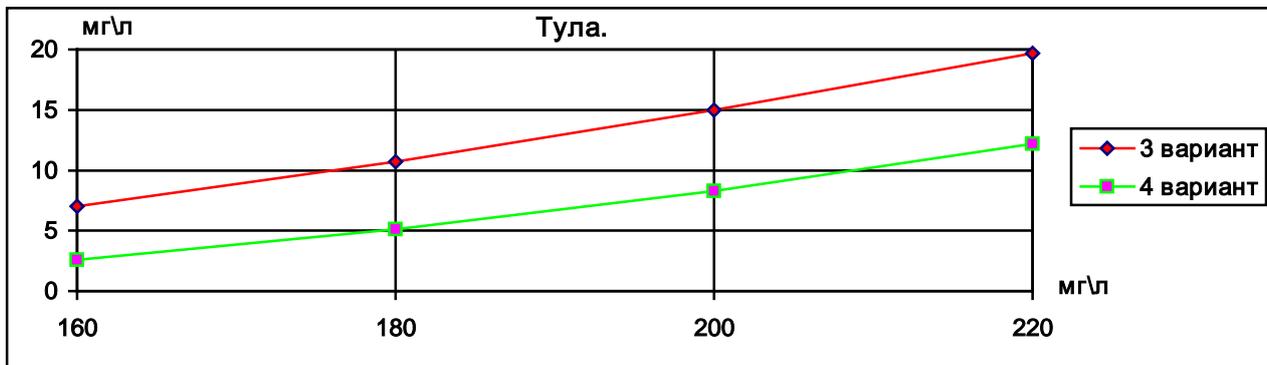
— В третьем варианте производились поливы сточными водами по влажности почвы (соответствует второму варианту в разделе 5.1).

— В четвертом варианте проводились поливы по жёсткому графику (соответствует третьему варианту в разделе 5.1)

Далее по третьему и четвертому варианту, были построены графики зависимостей изменения концентрации нитратов в сбросах в грунтовые воды от содержания аммония в сточных водах животноводческих комплексов, поступающих непосредственно в почву при поливах сельскохозяйственных полей (рисунки 5.1-24). Для построения результаты расчётов по двадцати летнему ряду наблюдений были усреднены.







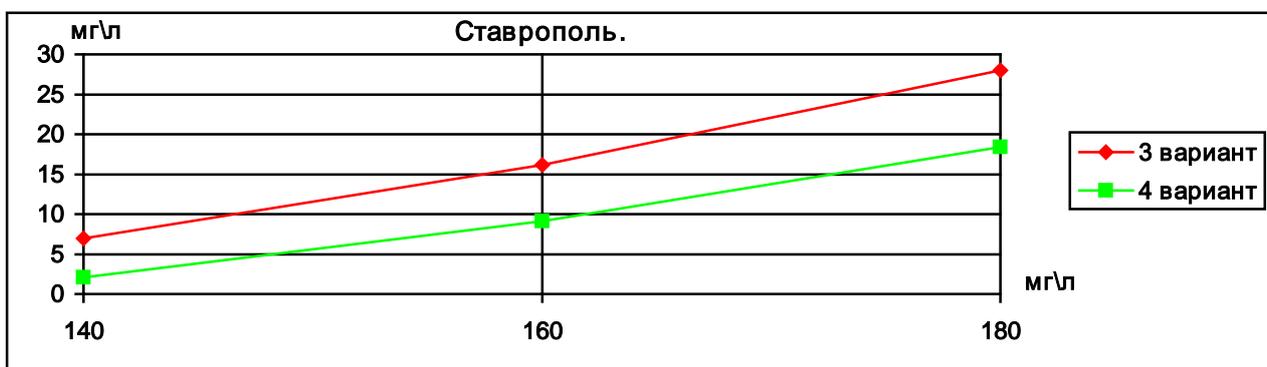
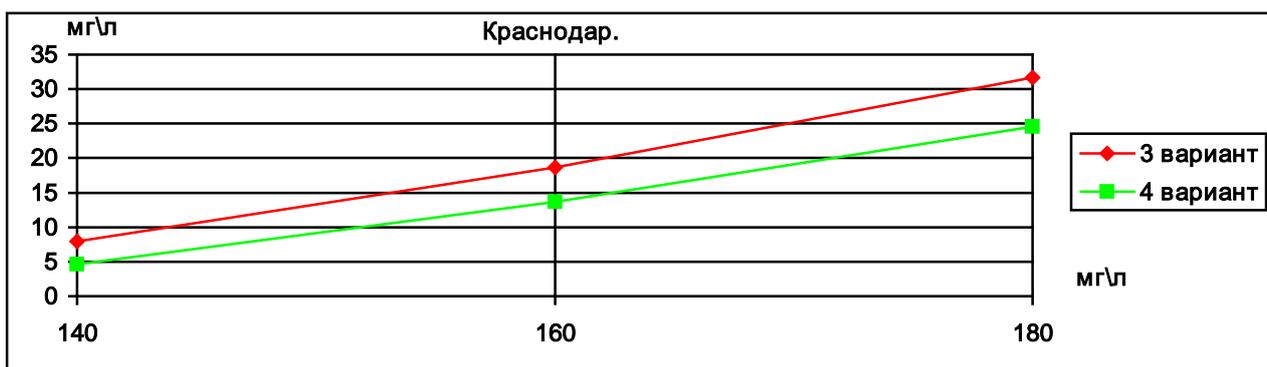
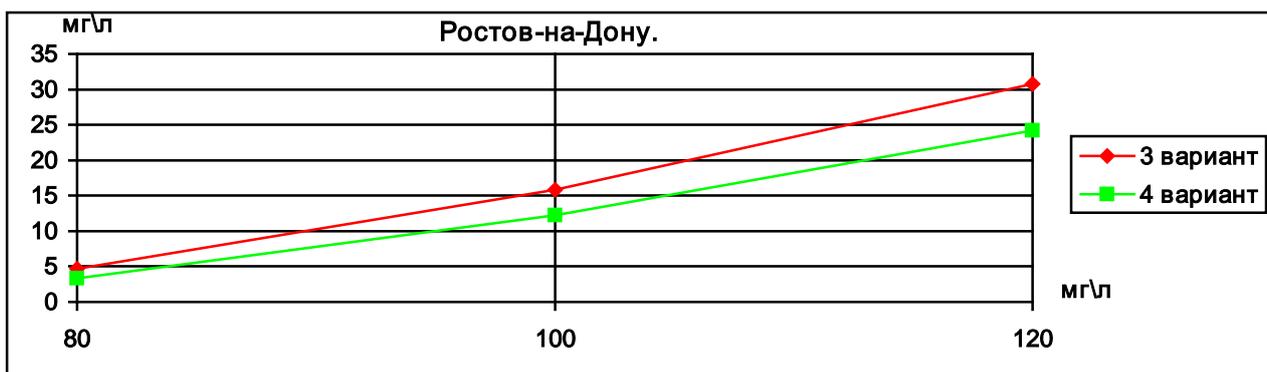
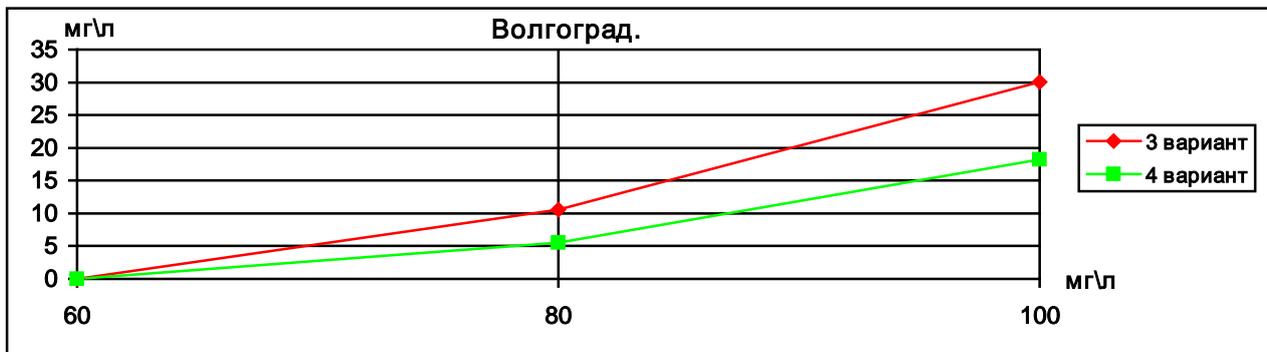


Рисунок 5.1 – Графики подбора концентраций аммония в поливной воде.

С графиков были сняты значения концентраций аммония в поливной воде, которые обеспечивали концентрации нитратов в сбросах в грунтовые воды не превышающие ПДК. По полученным таким образом концентрациям

были выполнены расчёты на экологическую безопасность утилизации сточных вод по данной технологии, по результатам которых оценивалась максимально допустимая нагрузка по азотным соединениям.

5.4. Моделирование трансформации азотных соединений в почве

Под трансформациями азотных соединений понимаются процессы нитрификации и денитрификации, протекающие в почвенном слое.

Из результатов моделирования приведённых в таблицах 5.17-5.30 в виде среднесуточных данных за 20 лет, видно, что в больших количествах корнями растений отбираются нитратные соединения азота, по сравнению с аммонийными соединениями. Причём в четвёртом варианте расчёта, по всем исследуемым областям, отбор корнями растений был наибольшим, по аммоний и по нитратам, что объясняется максимальным поступлением азотных соединений в почву, по сравнению с другими вариантами, и в то же время не полной обеспеченностью растений азотными соединениями, исходя из максимального потенциального выноса с урожаем (таблица 4.5). Так же, в сбросах азотных соединений, за корнеобитаемую зону и в грунтовые воды, преобладают нитраты (таблицы 5.27-5.44).

Однако, в сточных водах животноводческих комплексов, поступающих на поля основным азотным соединением, содержащимся в них, являются аммонийные соединения, содержание нитратов мало (таблицы 5.31-5.44), а также в процессе аммонификации гумусового вещества в почву поступает аммоний.

Таким образом, явный недостаток нитратов в почве восполняется за счет процессов нитрификации аммонийных форм азотных соединений, которые поступают в почву. Наряду с нитрификационными процессами, в почве протекают процессы денитрификации, которые обуславливают непроизводительные потери азота в виде газообразных форм.

В таблицах 5.27-5.30, в графах изменение запасов NO_3 , NH_4 приведены результаты по изменению содержания минеральных форм азота в почвенном слое.

Таблица – 5.17 Трансформации азотных соединений, Ленинградская область.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	5,5	4,55	4,65	0,2	-0,1	0
2	3,65	130,85	6,25	35,65	0	-0,5
3	41,9	132,75	178,3	32,3	-0,07	-0,07
4	47	161,35	210,55	35,8	0	-0,13

Таблица – 5.18 Трансформации азотных соединений, Кировская область.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	10	6,1	6,1	0,15	-0,05	-0,1
2	7,1	135,9	8,9	31,9	-0,03	-0,3
3	60,1	142,8	184,8	31	-0,1	-0,15
4	64,8	153,1	198,8	30,6	-0,06	-0,3

Таблица – 5.19 Трансформации азотных соединений, Ивановская область.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	7,2	5,1	4,8	0,1	-0,05	0
2	4,6	142,5	6,6	21,5	-0,03	-0,1
3	61,4	143,4	181,7	20,7	-0,13	-0,1
4	63,7	152,1	192,3	42,1	-0,1	-0,13

Таблица – 5.20 Трансформации азотных соединений, Казань.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	10,3	6,3	6,4	0,3	-0,06	-0,06
2	7,6	138	8,6	30	-0,04	-0,2
3	63,5	167,2	208,2	32,7	-0,1	-0,16
4	69,6	174,5	215,5	30,2	-0,05	-0,2

Таблица – 5.21 Трансформации азотных соединений, Московская область.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	10,1	7,7	7,3	0,3	-0,01	-0,01
2	7,3	132,6	9,7	35,6	-0,06	0
3	68,7	163	219,2	35,6	-0,06	-0,1
4	73,5	174,6	233	34,8	-0,01	-0,1

Таблица – 5.22 Трансформации азотных соединений, Смоленская область.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	8,2	6,3	5,8	0,8	-0,01	0
2	5,9	133,6	7,4	35,6	-0,05	0
3	66,9	171,3	230,1	41	-0,05	-0,05
4	71,8	183,1	243,6	40,7	-0,06	-0,1

Таблица – 5.23 Трансформации азотных соединений, Тульская область.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	41,3	35,9	36,3	1,6	-0,3	0
2	28,9	178,9	45,4	27,6	-0,3	-0,4
3	64,8	183,9	236	44,3	-0,5	-0,7
4	70,5	216,9	275,2	47,8	-0,4	-1,3

Таблица – 5.24 Трансформации азотных соединений, Оренбургская область.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	48,4	19,3	20,15	0,85	-0,15	-0,04
2	41,95	161,4	25,65	24,45	-0,2	-0,08
3	114,25	304,6	377,35	78,6	-0,5	-0,35
4	116,25	316,1	395,3	79,2	-0,6	-0,3

Таблица – 5.25 Трансформации азотных соединений, Саратовская область.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	28,6	16,35	16,85	0,65	-0,1	-0,14
2	23,65	156,65	20,5	24,6	-0,1	-0,45
3	95,1	278,4	349,3	72,1	-0,28	-0,55
4	102,7	306,7	376,3	69	-0,27	-0,6

Таблица – 5.26 Трансформации азотных соединений, Воронежская область.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	41,1	19,65	20	0,55	-0,1	-0,12
2	35,4	160,85	24,1	0	-0,1	-0,25
3	104,7	339,3	439	99	-0,3	-0,4
4	109,1	360	463,5	9,7	-0,35	-0,4

Таблица – 5.27 Трансформации азотных соединений, Волгоградская область.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	13,5	5,1	5,3	0,25	-0,03	0
2	11,7	139,1	6,5	27,45	-0,03	0
3	113,1	285,4	381,4	111,2	-0,1	-0,1
4	119,8	295,1	403,4	113,1	-0,1	-0,07

Таблица – 5.28 Трансформации азотных соединений, Ростовская область.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	53	28,1	29,8	2	-1,4	-0,7
2	46,3	173,2	36,5	23,65	-1,33	-0,9
3	99,4	305,1	374,4	72,2	-1,3	-0,73
4	104,2	320,7	400	74,4	-0,97	-0,7

Таблица – 5.29 Трансформации азотных соединений, Краснодар.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	69,3	22,5	24	1,3	-0,1	0
2	64,8	167,9	29	21,3	-0,1	-0,1
3	153,7	372,1	457,5	87,3	-0,8	-1,3
4	159,9	388	482	93,1	-0,9	-1,14

Таблица – 5.30 Трансформации азотных соединений, Ставрополь.

№ п/п	Отбор корнями NH ₄ кг	Отбор корнями NO ₃ кг	Количество NH ₄ ушедшее на нитрификацию кг	Потери на денитрификацию кг	Изменение запасов NH ₄ кг	Изменение запасов NO ₃ кг
1	74,8	23,6	24,6	1	-0,1	-0,17
2	69,2	170,7	30,4	20,1	-0,15	-0,3
3	150,6	338,8	415,3	77,8	-0,8	-0,63
4	155,7	368,3	457,1	84,7	-0,9	-0,77

5.5. Распределение азотных соединений в геохимических барьерах

В процессе моделирования оценивалось влияние растительного покрова, почвы и подстилающих грунтов полей орошения, как геохимических барьеров, на содержание азотных соединений в виде аммония и нитратов в сбросах влаги поступающих в грунтовые воды (таблицы 5.31-5.44).

Почвенный слой, как геохимический барьер, работал за счёт процесса сорбции аммонийных соединений, выражение (2.6), а также почва, представляя собой пористую среду значительно уменьшала скорость совместного передвижения азотных соединений и влаги на участке между прифермскими накопителями стоков и грунтовыми водами, в результате чего в почвенном растворе повышалась концентрация аммонийных и нитратных соединений. Большая роль почвы, заключается в процессах трансформации азотных соединений, о чем будет сказано ниже.

Подстилающие почвенный слой грунты выполняют функцию геохимического барьера за счёт уменьшения скорости передвижения азотных

соединений, растворенных в воде. Сорбция в данном случае мала по причине того, что азотные соединения в подстилающие грунты попадают большей частью в виде нитратных соединений, которые не сорбируются, а количество аммония мало, что видно из результатов моделирования (таблицы 5.31-5.44).

Наиболее эффективным, по результатам моделирования, в качестве геохимического барьера является растительный покров полей орошения при утилизации сточных вод животноводческих комплексов. Он в больших количествах, по сравнению с другими геохимическими барьерами, аккумулировал в себе азотные соединения.

Поскольку подземная часть растений в виде корней после окончания вегетационного периода остаётся в почве, и, следовательно, накопившейся в них азот тоже, то при моделировании растительного покрова в качестве геохимического барьера учитывался вынос азотных соединений надземной частью, в виде урожая. Таким образом, утилизационная способность полей орошения находится в прямой зависимости от того, в каких количествах растения способны поглощать азотные соединения, или иными словами выносить с урожаем.

Как видно из результатов моделирования утилизационная способность, которая оценивалась по количеству поступающего азота с поливной водой (таблицы 5.31-5.44), возрастает от северных областей к южным вместе с увеличением выноса азота с урожаем возделываемых культур.

Влияние на утилизационную способность оказывает также водный режим, который в нашем случае зависит от вида графиков полива сточными водами. Причём, наибольшая утилизационная способность во всех областях наблюдалась при четвёртом варианте (поливы по жёсткому графику), при котором формировался водный режим с наибольшими сбросами воды в грунтовые воды, что и обеспечивает предельно-допустимые концентрации азотных соединений в сбросах в подземные воды при более высоких дозах азота поступающего со сточными водами по сравнению с другими вариантами, в пределах одной области, за счёт большего разбавления водой.

Допустимые концентрации азотных соединений в сточных водах, поступающих на орошение зависели также и от природно-климатических условий исследуемых областей. На пример, в Ленинградской области, крайней северной точке, концентрации достигали наибольших значений по сравнению с другими, поскольку значения оросительных норм были наименьшими и равнялись 60 мм, исходя из условий выпадения и распределения осадков за время вегетационного периода, среднемноголетнее число поливов равнялось двум при поливной норме 30 мм, а утилизационная способность в сумме по третьему варианту равнялась 207,7 кг, по четвертому варианту 247,3 кг (табл. 39). Наименьшие концентрации зафиксированы в Волгоградской области, где оросительные нормы равнялись 720 мм при поливных 60 мм, на фоне небольших осадков за вегетационный период 212 мм, утилизационная способность составила 484,6 кг и 513,1 кг чистого азота, по третьему и четвертому варианту соответственно таблица 5.41. Наибольшая утилизационная способность, по результатам моделирования, была получена в Краснодаре, которая составила 503,4 кг и 538,5 кг – по третьему и четвертому варианту расчёта.

Таким образом, концентраций азотных соединений содержащихся в сточных водах животноводческих комплексов поступающих на поливы, зависят от оросительных норм, которые отражают связь между количеством и неравномерностью выпадения осадков, а также от работы геохимических барьеров.

Таблица – 5.31 Среднемноголетний азотный режим Ленинградской области.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	0	0	10	0
2	0/0	0/0	0/0	0/0,35	0/0	134,5	160
3	413/10	206,3/1,4	0/14,9	0,2/16,5	0/10,08	174,75	0
4	513/10	246,3/1	0/14,8	0,3/16,1	0/10,04	208,7	0

Таблица – 5.32 Среднегодовое азотное содержание в почвах Кировской области.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	16	0
2	0/0	0/0	0/1,4	0/1,3	0/2,5	143	160
3	109/10	225,1/6	0/18,6	0,35/18,6	0/9,6	202,8	0
4	114/10	245,7/6,3	0/21,7	0/21,7	0/9,3	217,9	0

Таблица – 5.33 Среднегодовое азотное содержание в почвах Ивановской области.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	12,3	0
2	0/0	0/0	0/2,8	0/3,2	0/2,9	147,1	160
3	103/10	229,2/6,5	0/24,1	0,7/26,35	0/9,8	204,9	0
4	113/10	243,5/6,3	0/25,7	1,1/27,7	0/9,9	215,8	0

Таблица – 5.34 Среднегодовое азотное содержание в почвах Казани.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	0	0	16,5	0
2	0/0	0/0	0/0,9	0/0,7	0/2,1	145,5	160
3	109/10	248,8/6,7	0/15,3	0,2/16,2	0/9,5	230,7	0
4	118/10	265,4/6,6	0/17,6	0,5/18,4	0/10,6	244	0

Таблица – 5.35 Среднемноголетний азотный режим Московской области.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	0	0	17,8	0
2	0/0	0/0	0/1,6	0/1,8	0/1,1	139,8	160
3	200/10	266,6/3,9	0/24,7	0,5/26,5	0/9,9	231,6	0
4	200/10	288,4/4,2	0/28	1,1/29,6	0/10	248,1	0

Таблица – 5.36 Среднемноголетний азотный режим Смоленской области.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	14,5	0
2	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	139,5	160
3	300/10	278,9/2,7	0/20,6	0,05/22,6	0/9,8	238,2	0
4	313/10	300,5/2,8	0/22,7	0,4/24,7	0/10	254,9	0

Таблица – 5.37 Среднемноголетний азотный режим Тульской области.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	77,2	0
2	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	207,8	160,4
3	176/10	218,4/3,6	0/12,2	0,2/13,6	0/10	248,6	0
4	208/10	267,2/3,8	0/15,6	0,5/16,7	0/9,7	287,3	0

Таблица – 5.38 Среднемноголетний азотный режим Оренбургской области.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	0/0	0	67,7	0
2	0/0	0/0	0/0	0,15/0	0/0	203,4	160
3	102/10	408/11,6	0/6,2	0,15/8,6	0/9,7	418,8	0
4	109/10	431/11,5	0/11,9	0,4/14,9	0/10	432,3	0

Таблица – 5.39 Среднемноголетний азотный режим Саратовской области.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	0/0	0	44,9	0
2	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	180,35	160
3	129/10	387,6/8,7	0/8,2	0,05/9,75	0/9,5	373,5	0
4	151/10	431,5/8,3	0/14,55	0,3/16,25	0/9,4	409,5	0

Таблица – 5.40 Среднемноголетний азотный режим Воронежская область.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	0/0	0	60,65	0
2	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	196,25	160
3	136/10	464,8/9,9	0/11,2	0,2/14,4	0/9,6	444	0
4	141/10	499,7/9,6	0/16,6	0,85/20	0/9,8	469	0

Таблица – 5.41 Среднегодовое азотное содержание в Волгоградской области.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	0/0	0	18,5	0
2	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	150,75	160
3	79/10	467,4/17	0/2,2	0/5,4	0/9,5	398,5	0
4	87/10	496,5/17	0/12,1	0,1/16,8	0/9,3	414,8	0

Таблица – 5.42 Среднегодовое азотное содержание в Ростовской области.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	0,5/0	0	81,1	0
2	0/0	0/0	0/0	0,6/0	0/0	219,45	160
3	89/10	371,8/12	0/10,1	0,7/11,3	0/9,5	404,3	0
4	95/10	404,6/12	0/17,6	2/19	0/9,4	424,9	0

Таблица – 5.43 Среднегодовое азотное содержание в Краснодаре.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	1,2/0	0	91,8	0
2	0/0	0/0	0/0	1,3/0	0/0	232,7	160
3	144/10	493,4/10	0/9,4	1,4/10,6	0/9,9	525,8	0
4	152/10	528,4/10	0/15,3	2,6/16,3	0/9,9	548,8	0

Таблица – 5.44 Среднегодовое азотное содержание в Ставрополе.

№ п/п	NH ₄ /NO ₃ в поливной воде, мг/л	Приход чистого азота с водой по NH ₄ /NO ₃ кг	Количество чистого азота поступившего в ГВ по NH ₄ /NO ₃ кг	Сброс чистого азота за корнеобитаемую зону по NH ₄ /NO ₃ кг	Концентр. чистого азота в сбросах, среднее по NH ₄ /NO ₃ мг/л	Вынос чистого азота с урожаем, среднее, кг	Внесение чистого азота в виде удобрений ежегодно, кг
1	0/0	0/0	0/0	0,3/0	0	98,4	0
2	0/0	0/0	0/0	0,4/0	0/0	240	160
3	147/10	440,4/8,7	0/8,1	0,3/10	0/9,9	489,4	0
4	162/10	493,5/8,9	0/13,8	0,8/15,9	0/9,8	524	0

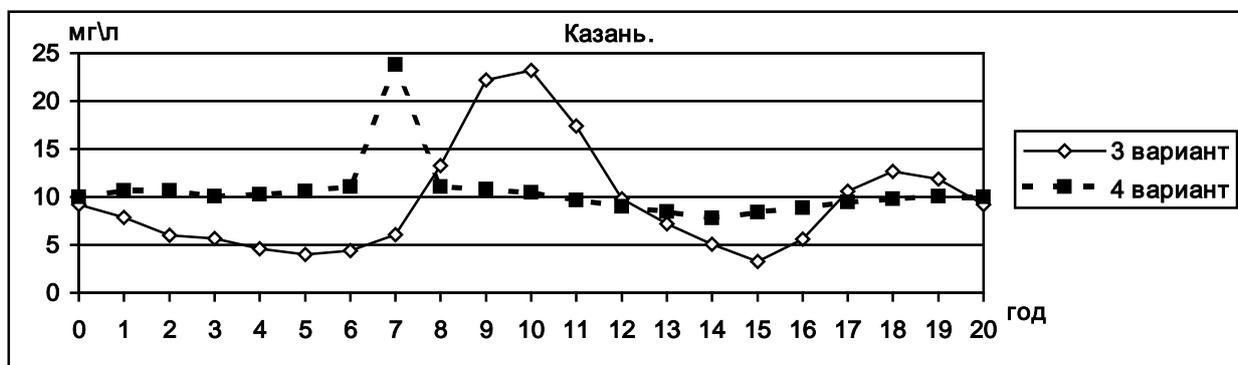
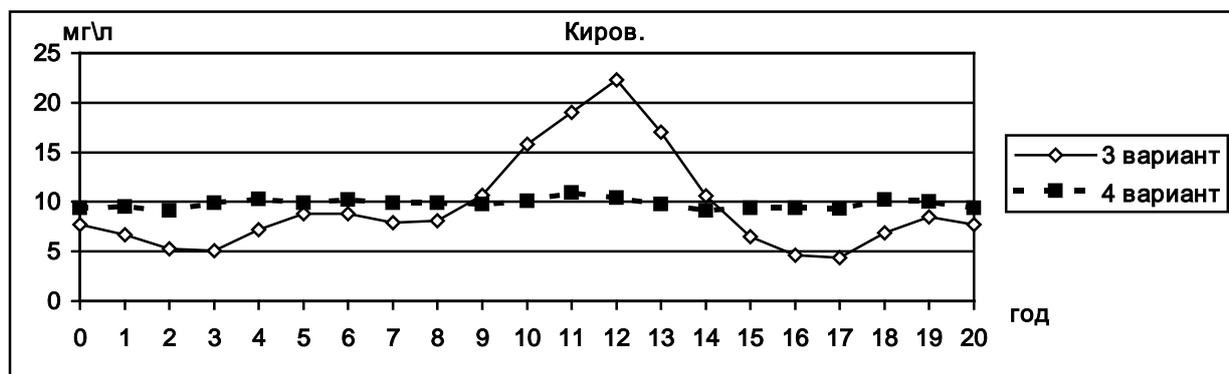
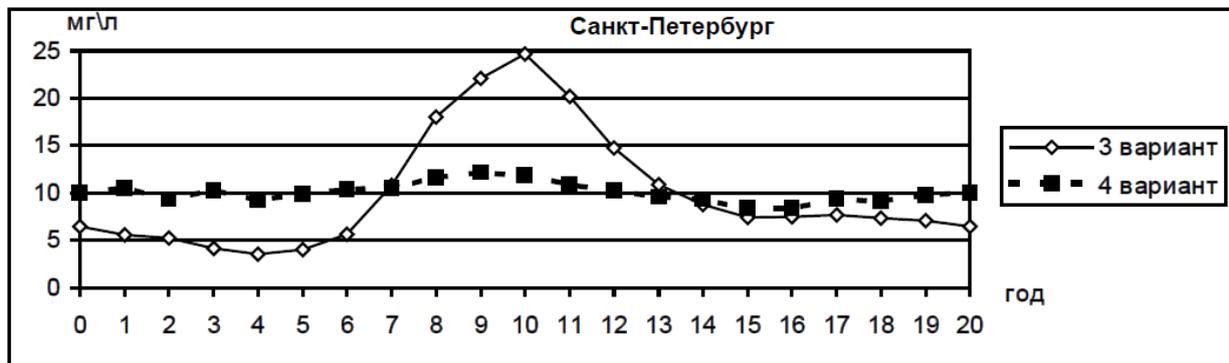
5.6. Динамика поступления нитратных соединений в грунтовые воды

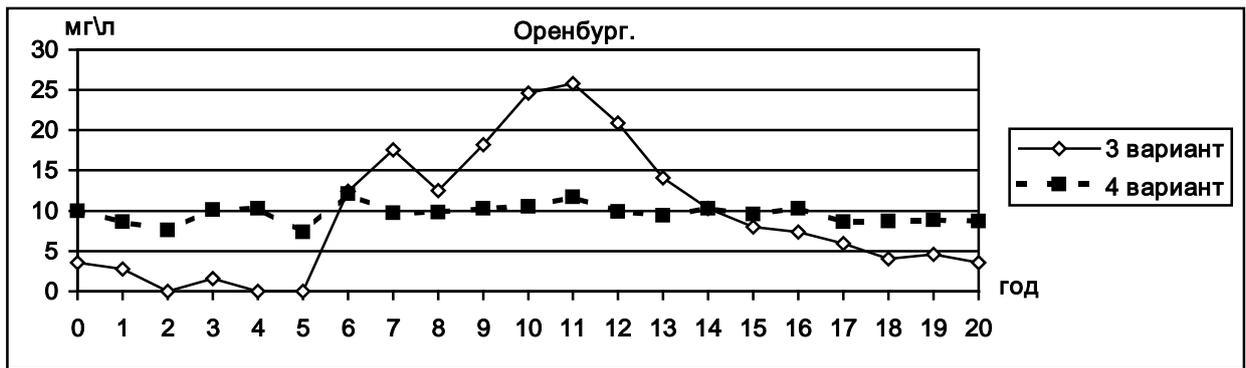
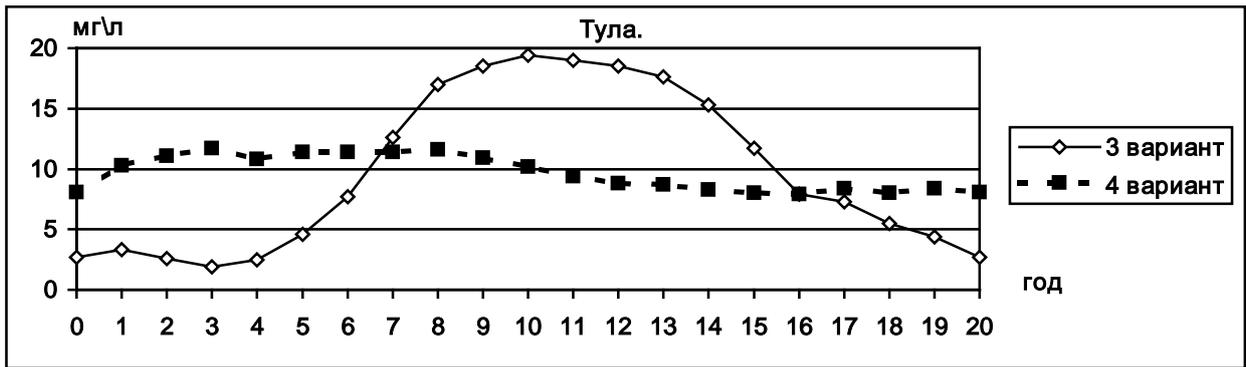
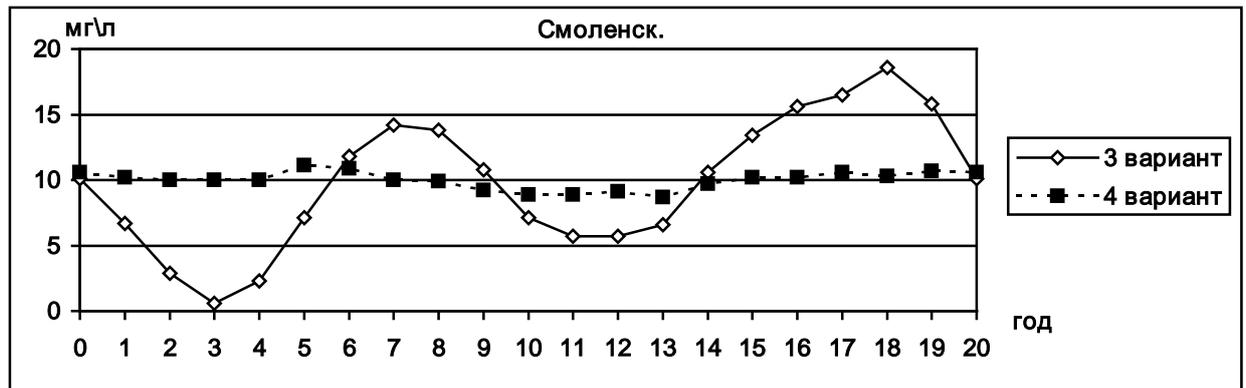
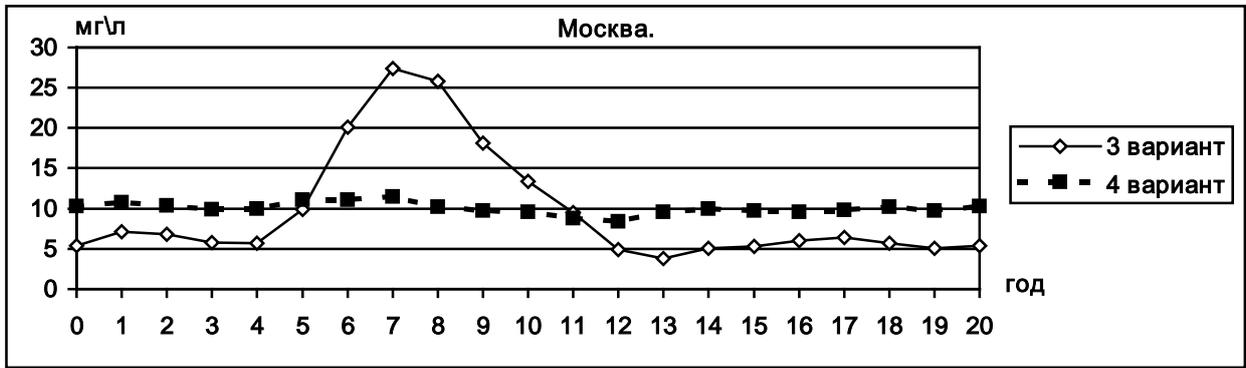
В процессе моделирования утилизации сточных вод животноводческих комплексов за 20 лет, наряду со среднегодовой концентрацией нитратных соединений в сбросах, поступающих в грунтовые воды полей орошения таблицы 5.31 - 5.44, также был произведён анализ динамики изменения концентраций за каждый оригинальный год расчётного периода рисунок 5.2, при моделировании по третьему и четвёртому варианту расчётов.

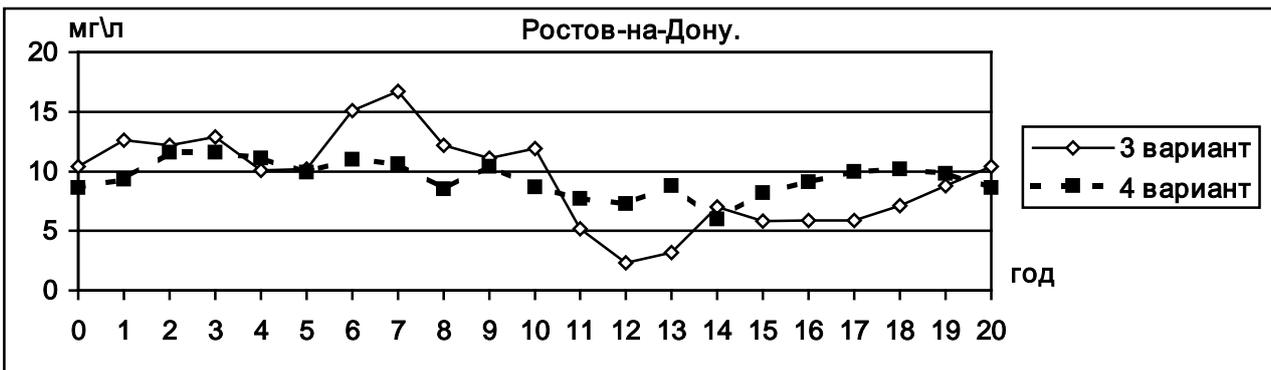
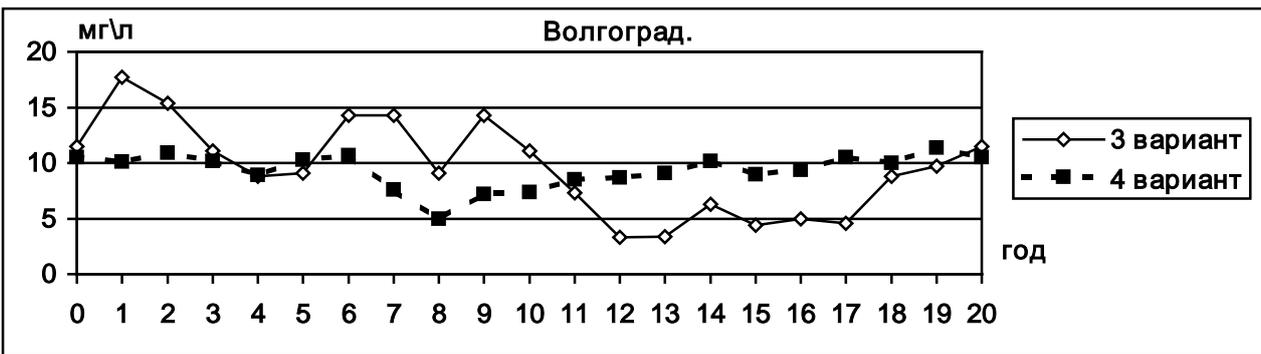
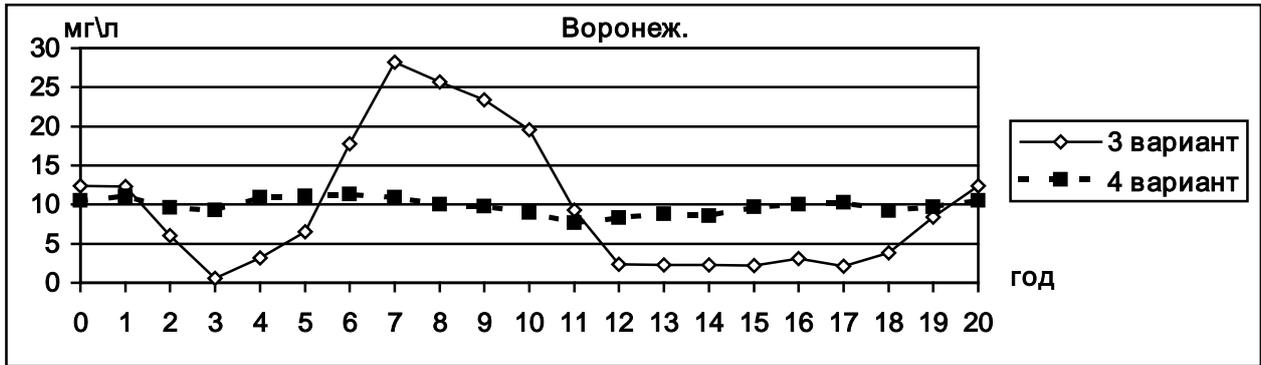
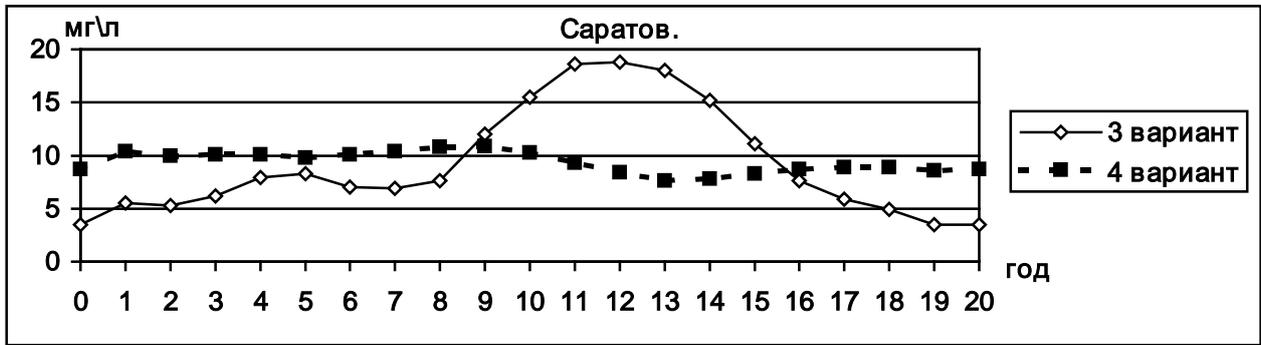
При поливах сточными водами животноводческих комплексов по третьему варианту, наблюдались значительные среднегодовые колебания концентраций нитратных соединений в сбросах в грунтовые воды по всем исследуемым областям, тогда как среднегодовые концентрации находились на уровне ПДК. Причём, среднегодовые значения концентраций нитратов в сбросах или превышали ПДК, или были ниже, более чем в два раза. Такой большой диапазон колебаний происходил по причине меняющихся каждый год природно-климатических условий.

При проведении поливов по четвёртому варианту расчётов, среднегодовая амплитуда колебаний концентраций нитратов, относительно ПДК, была значительно меньше. Причиной сглаживания графиков колебания концентраций нитратов является увеличение сбросов воды в грунтовые воды (рисунок 5.2), по сравнению с третьим вариантом, в результате чего происходит

большее разбавление нитратных соединений, и как следствие снижение концентраций в сбросах.







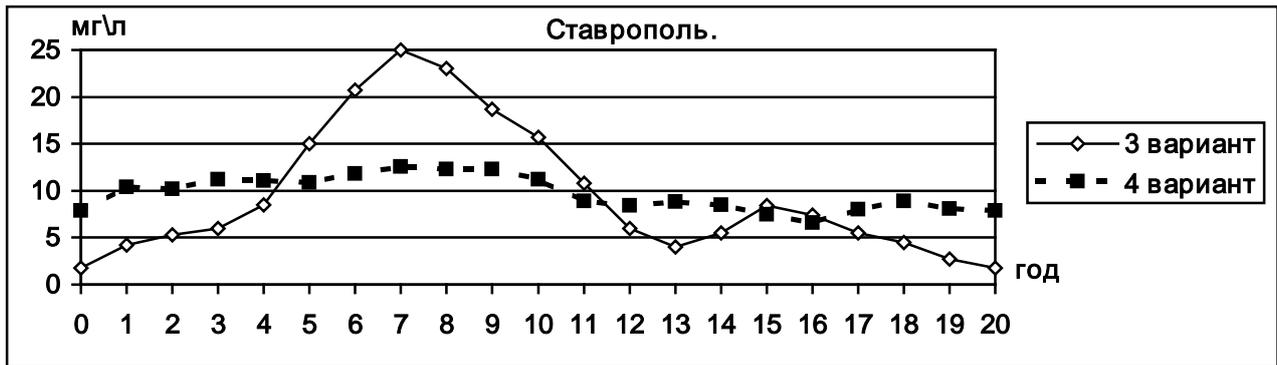
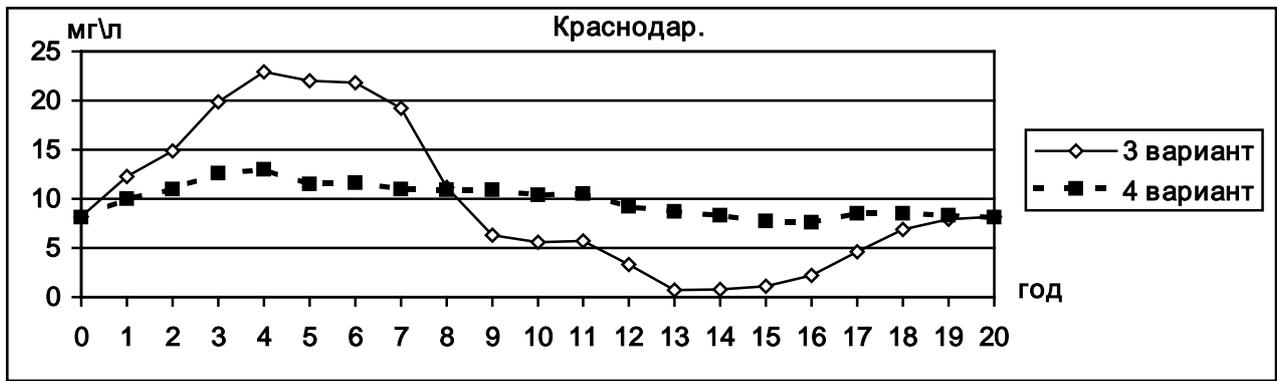


Рисунок 5.2 – Динамика изменения концентраций за каждый год расчётного периода при моделировании по третьему и четвёртому варианту расчётов.

Таким образом, несмотря на то, что при поливах по гибкому графику наблюдаются наименьшие сбросы влаги за счёт точного регулирования влажности в почве, промываемость почв по сравнению с жёстким графиком полива значительно меньше, обеспечиваются максимальные урожаи многолетних трав, данный вариант поливов не подходит для утилизации сточных вод животноводства.

Во-первых, при поливах по гибкому графику происходят значительные превышения ПДК концентрации нитратов в сбросах в грунтовые воды при прогнозировании каждого года за 20^{ти} летний ряд наблюдений (рисунок 5.2), при среднемноголетней концентрации нитратов, не превышающих ПДК, что не отвечает главной задаче данного мероприятия, рассматриваемого прежде всего, как природоохранного. Обеспечение среднегодовой концентрации нитратов в сбросах в грунтовые воды, не превышающей ПДК при данном графике полива, невозможно из-за стохастичности погодных условий.

Во-вторых, при поливах по гибкому графику число поливов и значения оросительных норм за каждый год сильно колеблется и в засушливые годы

может принимать нулевые значения (таблица 5.2), что также связано со стохастикой погодных условий, что приводит к необходимости строительства огромных накопителей животноводческих стоков для регулирования неравномерности расходования и поступления животноводческих стоков, объём которых постоянен при одной и той же численности голов, что экономически нецелесообразно.

Недостатками жесткого графика полива является то, что, при нём наблюдаются наибольшие сбросы влаги в грунтовые воды, максимальная промываемость почв и меньшие урожаи многолетних трав по сравнению с гибким графиком полива, однако поливы по жёсткому графику отвечают главной задаче данного мероприятия, рассматриваемого как природоохранного.

Во-первых, значения среднегодовых концентраций нитратов в сбросах в грунтовые воды в отдельные годы незначительно превышают ПДК при среднемноголетней концентрации, равной ПДК (рисунок 5.2), что объясняется сглаживанием стохастических погодных условий по причине, рассмотренной выше.

Во-вторых, оросительные нормы и число поливов за каждый год постоянны, а, следовательно, и объём животноводческих стоков, подаваемых на орошение, каждый год один и тот же, таким образом, объём и размеры накопителя, требуемые для регулирования, значительно меньше, что влечёт за собой меньшие экономические и эксплуатационные затраты на его строительство и эксплуатацию.

5.7. Расчёт экологически безопасной нормы внесения животноводческих стоков на сельскохозяйственных полях орошения в зависимости от природно-климатических условий с использованием цифровых технологий

Суточная масса экскрементов от одного животного зависит от вида и составляет:

- у молочных коров – 55 кг при 12 % твёрдой фракции;
- у молодняка на откорме в зависимости от возраста – 14...35 кг при 14 % твёрдой фракции;

- у ремонтного молодняка и нетелей – 14...27 кг при 14 % твёрдой фракции;
- у свиней на откорме – 3,5...6,6 кг при 13 % твёрдой фракции.

Годовое количество навоза, из которого формируются стоки, зависит от способа содержания животных. Так, свиньи и молодняк крупного рогатого скота содержатся беспривязно и безвыгульно в помещениях ферм, годовое количество навоза равно производству суточной массы экскрементов на число дней в году.

Молочные коровы могут содержаться в стойлах на привязи и некоторое время на выгульно-кормовых площадках. Годовой объём навоза, образующий стоки, в этом случае на 10...15 % меньше за счёт потерь на выгульно-кормовых площадках в результате испарения и вымывания.

На фермах со стойлово-пастбищным содержанием коров годовой объём навоза уменьшается на 30 % за счёт потерь на пастбище.

В экскрементах коров содержится азота 0,43 %, у молодняка крупного рогатого скота – 0,77 %, у свиней – 0,72 % [33, 41, 50, 51, 134, 147].

Следует отметить, что при хранении животноводческих стоков потери азотных соединений составляют 20...30 %, а при внесении дождеванием 10...15 % [41,135].

Из таблиц 5.31 - 5.44 берём суммарный приход нитратного и аммонийного азота для четвёртого варианта расчёта (полив по жёсткому графику), так как он является наиболее эффективным с точки зрения экологически безопасного функционирования полей утилизации. Далее рассчитываем допустимый объём экскрементов на единицу площади по формуле:

$$ГП = \frac{П}{AZ \cdot K_x \cdot K_b \cdot (1 - TФ)} 100, \text{ кг/га в год} \quad (5.1)$$

ГП – годовая количество экскрементов;

П – суммарный приход азотных соединений с оросительной водой кг/га;

AZ – содержание азота в экскрементах животных в %, зависящие от вида содержащихся животных;

K_x – коэффициент, учитывающий потери азотных соединений при хранении, лежит в пределах 0,7...0,75 и принят равным 0,7;

K_B – коэффициент, учитывающий потери при внесении, находится в пределах 0,85... 0,90 и принят равным 0,85;

ТФ – количество твёрдой фракции содержащиеся в экскрементах и выраженное в долях;

Количество голов приходящиеся на один гектар при экологически безопасной утилизации стоков определяется по формуле:

$$N = \frac{ГП}{СВ \cdot 365 \cdot (1 - С)}, \text{ гол /га} \quad (5.2)$$

N – количество голов на один гектар;

$СВ$ – суточный выход экскрементов от одного животного;

$С$ – потери, зависящие от способа содержания животных в долях, приняты равными для коров 0,15

Суточный выход экскрементов с одного животного для расчёта принят равным 55 кг для молочных коров, 27 кг для молодняка КРС, для свиней 6,6 кг.

Результаты расчётов представлены в таблице 5.45 из которых видно, что количество голов приходящиеся на единицу площади увеличивается от северных областей к южным, что связано с увеличением выноса азотных соединений с урожаем многолетними травами (таблицы 5.31 – 5.44).

Таблица 5.45 – Нагрузка на поля утилизации в зависимости от природно - климатических условий

Областной центр	Молочные коровы, голов на га	Молодняк КРС, голов на га	Свиньи, голов на га
1	2	3	4
Санкт-Петербург	6,4	6,4	27,5
Киров	6,6	6,5	28,1

Продолжение таблицы 5.45

1	2	3	4
Иваново	6,5	6,4	27,8
Казань	7,1	7	30,3
Москва	7,6	7,5	32,6
Смоленск	7,9	7,8	33,8
Тула	7,1	7	30,2
Оренбург	11,5	11,4	49,3
Саратов	11,5	11,4	49
Воронеж	13,3	13,2	56,7
Волгоград	13,4	13,3	57,2
Ростов-на-Дону	10,8	10,7	46,4
Краснодар	14	13,9	60
Ставрополь	13,1	13	56

Примечание: результаты по молочным коровам приведены для случая содержания в стойлах и некоторое время на выгульно-кормовых площадках.

Основные положения экологически безопасной утилизации животноводческих стоков на сельскохозяйственных полях орошения с использованием цифровых технологий

1. Анализ литературных работ и экспериментальных исследований ряда научно-исследовательских организаций по вопросу взаимодействия сточных вод животноводческих комплексов и компонентов геосистем, показал, что основным и наиболее активным загрязнителем почв, грунтов и грунтовых вод являются азотные соединения представленные нитратами.

2. Применение теории геосистемного подхода к проблеме утилизации сточных вод животноводческих комплексов и рассмотрение составляющих окружающей среды в качестве геохимических барьеров на пути миграций загрязняющих веществ, позволяет рассматривать влияние техногенных воздействий на окружающую среду в целом, а не на отдельные её компоненты.

3. При утилизации сточных вод животноводческих комплексов на ирригационных полях орошения с выращиванием на них сельскохозяйственной продукции необходим подход с точки зрения максимальной безопасности утилизации стоков для окружающей среды, а не с позиции получения максимальных урожаев.

4. Для создания оптимальных условий функционирования земель, орошаемых сточными водами, исходя из условий максимально возможной экологической безопасности, необходимо составление долгосрочного прогноза развития экологической ситуации с учётом всех природных условий объекта, что представляется возможным с помощью математического моделирования. С этой целью разработана математическая модель передвижения минеральных азотных соединений и влаги в почве и подстилающих грунтах до уровня грунтовых вод, с учётом климатических условий и процессов отбора азотных соединений растениями, а также их трансформаций.

5. Предложена нелинейная изотерма сорбции аммония ППК позволяющая вести расчёты при больших концентрациях последнего в почвенном растворе и вместе с тем при малых концентрациях реализуя закон Генри.

6. С помощью математического моделирования выполнен двадцати летний прогноз экологической обстановки по четырнадцати областям Российской Федерации с использованием реальных метеоданных за каждый расчётный год по областям и получены следующие результаты:

- определены максимально допустимые концентрации содержания азотных соединений в водах используемых для орошения земель из условий экологической безопасности при выращивании на них многолетних злаковых трав как наиболее активных азотопотребителей и построены зависимости изменения поступления азотных соединений в грунтовые воды земель орошаемых стоками животноводства от их концентраций в поливных водах при назначении поливов с учётом влажности почвы на момент проведения поливов и без токового;
- показано, что наиболее эффективным геохимическим барьером на пути азотных соединений как загрязнителей является растительный покров полей утилизации стоков.

7. Установлено что в грунтовые воды поступает в основном нитратные соединения (за исключением случаев близкого расположения грунтовых вод от поверхности), а аммонийный азот подвергается трансформации и сорбции, и практически не попадает в грунтовые воды при обоснованных концентрациях азотных соединений и оросительных норм. При завышенных концентрациях и оросительных нормах аммонийный азот может потоком вымываться из верхних слоёв почвы, где в основном проходят процессы нитрификации, и перемещаясь с влагой в низ лежащих грунтах поступать в грунтовые воды.

8. Динамика поступления азотных соединений в грунтовые воды в течение расчётного промежутка времени, за каждый год, резко изменяется, при постоянных концентрациях азотных соединений, в поливной воде обеспечивающих среднемноголетнее поступление в грунтовые воды на уровне не превышающим ПДК, что обуславливается постоянным изменением погодных условия из года в год. Наиболее резкие колебания наблюдаются при поливах, назначаемых в зависимости от влажности почвы, а менее резкие - при

проведении поливов без учёта влажности за счёт большего разбавления инфильтрационных вод. Таким образом, несмотря на то что, поливы без учёта влажности почвы обеспечивают наибольший сброс воды в грунтовые воды, обеспечивают более низкие урожаи культур и повышенный расход поливной воды, по сравнению с поливами, назначаемыми по влажности почвы, они являются наиболее предпочтительными с точки зрения обеспечения экологической безопасности функционирования полей утилизации животноводческих сточных вод.

9. Соответствие величин среднегодовой инфильтрации полученной расчётным путём с литературными данными показывает, что передвижение влаги в почве и подстилающих грунтах моделью отражается правильно. Сопоставление расчётных данных по изменению содержания азотных соединений в почве с экспериментальными правильно отображает характер трансформаций азотных, расходования и передвижения азотных соединений, и может быть использована для составления прогнозов, разработок стратегий утилизации и оценки эффективности технологий обработки сточных вод животноводческих комплексов с позиции экологической безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агрохимическая характеристика почв СССР. Почвенно-агрохимическое районирование. – М.: Наука, 1976, с. 290-345.
2. Айдаров И. П., Голованов А. И., Никольский Ю. Н. Оптимизация мелиоративных режимов орошаемых и осушаемых сельскохозяйственных земель. - М.: Агропромиздат 1990. - 59 с.
3. Алпатьев А.М. Характеристика и географическое распространение засух / А.М. Алпатьев, В.М. Иванова // Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. Л.: Гидрометеиздат, 1958. С. 31 - 45.
4. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. - М.: Гостехиздат, 1973. - 616 с.
5. Афанасьева Т. В., Василенко В. И., Терёшина Т. В., Шеремет Б. В. / Почвы СССР //- М.: Мысль, 1979, с. 43-77.
6. Ахметьева Н. П. Загрязнение грунтовых вод удобрениями. - М.: Наука, 1991. - 100 с.
7. Баланс азота и трансформация азотных удобрений в почвах. - Пущино, 1986. - 159 с.
8. Бардин М.Ю. Антициклоническая квазистационарная циркуляция и ее влияние на аномалии и экстремумы температуры воздуха в западных областях России / М.Ю. Бардин // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 5 - 17.
9. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. - М.: ИКИ РАН, 2016 г.
10. Барышова Н. А. Формирование химических веществ в основных геосистемах центральной лесостепи. - в кн.: Геосистемный мониторинг. Строение и функционирование геосистем. - М.: АН СССР Институт географии, 1986, с. 157-166.
11. Бацанов И.И., Лукьяненок И.И. Уборка и утилизация навоза на свиноводческих комплексах . –М.: Агропромиздат, 2010 -160 с.

12. Безопасное использование органических отходов свиноводческих комплексов при вовлечении в оборот земель сельскохозяйственного назначения: Методические рекомендации / В. А. Шевченко, А. М. Соловьев, Г. И. Бондарева [и др.]. – Москва Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2021. – 40 с.
13. Биогеохимический круговорот веществ в биосфере. / ред. Ковда В.А / - М.: Наука, 1987, с. 75-92.
14. Бондарева Г.И., Евграфов А.В., Харитонов С.И., Кульчев А.Ю. Оценка выбывших из оборота земель Нечерноземной зоны по категории загрязнения // Сельский механизатор. - 2022. - № 5. - С. 26-27.
15. Бородычев, В. В. Нужен ли дренаж орошаемых земель в Волгоградской области? / В. В. Бородычев, И. И. Конторович // Мелиорация и водное хозяйство. – 2022. – № 4. – С. 36-41.
16. Буряк, С. М. Восстановление плодородия малопродуктивных дерново-подзолистых почв, вновь вводимых в сельскохозяйственный оборот / С. М. Буряк, О. В. Черникова, Ю. А. Мажайский // Вестник КрасГАУ. – 2024. – № 1(202). – С. 56-63.
17. Буцикин А.М., Луцкий В.Г., Понаморёв А.Г. Технология орошения животноводческими стоками. - М.: Агропромиздат, 1987, с. 5-59.
18. Вадновская И.К., Лукашев К.И. Геохимические основы охраны биосферы. - Минск: Наука и Техника, 1977. - 175 с.
19. Валынец З.Ф., Валынец М.П. Аналитическая химия азота. - М.: Наука, 1977. - с. 308.
20. Виноградова, Л.И. Основы мелиорации земель [Электронный ресурс]: учебное пособие / Л.И. Виноградова, Г.Н. Долматов; Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2021 – 166 с.
21. Влияние разноглубинной заделки органического вещества на агрохимические показатели плодородия мелиорированной дерново-подзолистой почвы / В. А. Шевченко, Н. С. Матюк, А. М. Соловьев [и др.] // Научные подходы к современному развитию мелиорации земель: Сборник научных трудов / Рассмотрено и одобрено на Ученом Совете ФГБНУ

«ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова». – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2023. – С. 345-355.

22. Влияние удобрений и способов их заделки на баланс органического вещества почвы при возделывании озимой пшеницы в условиях Верхневолжья / В. А. Шевченко, А. М. Соловьев, Г. И. Бондарева, Н. П. Попова // Плодородие. – 2024. – № 1(136). – С. 32-36.

23. Влияние удобрений и способов их заделки на кормовую ценность полевых культур при освоении малопродуктивных земель Верхневолжья / В. А. Шевченко, А. М. Соловьев, Г. И. Бондарева, Н. П. Попова // Плодородие. – 2023. – № 2(131). – С. 5-8.

24. Воробьева Л.А. Химический анализ почв: Учебник. - М.: Изд-во МГУ, 1998. - 272 с.

25. Вотоотведение сточных вод /Яковлев С.В., Каремин Я.А., Ласков Ю.М. – М.: Стройиздат, -2006, 586 с.

26. Гамзиков Т. П. / Баланс и превращение азота удобрений // Новосибирск: Наука, 2005, с. 21-43.

27. Георгиади А.Г. Долговременные фазы климатических и гидрологических изменений / А.Г. Георгиади, Е.А. Кашутина // Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. М.: ООО «МАКС-Пресс», 2014. С. 63 - 85.

28. Георгиади А.Г. Долговременные фазы многолетних изменений стока воды и тепла крупнейших арктических рек России / А.Г. Георгиади, Е.А. Кашутина, И.П. Милюкова // Тезисы докладов всероссийской конференции Междисциплинарные научные исследования в целях освоения горных и арктических территорий: г. Сочи 24 - 29 сентября 2018 года; Институт географии Российской академии наук, Гляциологическая ассоциация. М., 2018. С. 53.

29. Гидротехнические мелиорации: учебное пособие / Е. А. Гребенщикова, Н. А. Горбачева, – Благовещенск: Изд-во Дальневосточного гос. аграрного ун-та, 2019 – 156[1] с.

30. Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство) / Р. С. Х. Эдельгериев, А. Л. Иванов, И. М. Донник [и др.]. – Москва: Издательство МБА, 2021. – 700 с.
31. Глобус А.М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. - 427 с.
32. Горбунов Н. И. Минерология и физическая химия почв. - М.: Наука, 1978, с. 152.-179.
33. ГОСТ 17.5.3.06-85 "Охрана природы. Земли. Требования к определению норм снятия плодородного слоя почвы при производстве земляных работ".
34. ГОСТ 17.5.3.05-84 "Охрана природы. Рекультивация земель. Общие требования к землеванию".
35. ГОСТ 17.4.3.06-2020 "Охрана природы. Почвы. Общие требования к классификации почв по влиянию на них химических загрязняющих веществ".
36. ГОСТ 17.4.3.02-85 "Охрана природы. Почвы. Требования к охране плодородного слоя почвы при производстве земляных работ".
37. Грин А. М. / Геосистема как объект мониторинга. // Геосистемный мониторинг в биосферных заповедниках. - М.: 1984, с. 6...14.
38. Громов А. В. Расчёт водного режима и динамика соединений азота в почве в зоне аэрации: / Гидравлика русловых потоков. // Калинин: КГУ, 1989, с. 53-58.
39. Гузалов, А. С. Инновационное развитие инженерно-технической системы АПК / А. С. Гузалов, Р. Н. Дидманидзе // Сборник студенческих научных работ: Материалы конференции, Москва, 14–17 марта 2017 года. Том 23. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2017. – С. 173-179.

40. Дедова Э.Б., Дедова А.А. Продуктивность и эколого-мелиоративное состояние пастбищных угодий полупустынной зоны Калмыкии // The Scientific Heritage. - 2021, volume 2, № 71 - С. 3-6.
41. Демиденко, Г.А. Ландшафтоведение: учеб. пособие [Электронный ресурс] / Г.А. Демиденко; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2018. – 139 с. <http://www.kgau.ru/new/student/43/content/11.pdf>
42. Джапова Р.Р. Динамика пастбищ и сенокосов Калмыкии / Р.Р. Джапова. - Элиста: Изд-во Калмыцкого университета, 2008 г. - 176 с.
43. Дидманидзе, О.Н. Результаты исследований температурного режима осушаемой торфяной почвы / О.Н. Дидманидзе, Е.П. Парлюк, А.В. Евграфов // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 45-49.
44. Дидманидзе, Р. Н. Научные основы применения минеральных удобрений в Нечерноземной зоне / Р. Н. Дидманидзе, А. С. Гузалов. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Автограф", 2020. – 85 с.
45. Дмитриева В. И. Загрязнение водоёмов навозными стоками и методы их охраны: / Использование сточных вод и навозных стоков на орошение и удобрение сельскохозяйственных угодий. // - М.: ВНИИГиМ, 1985, с. 19-20.
46. Додолина В. Т. / Принципы классификации сточных вод по агромелиоративным показателям. // Использование сточных вод для орошения. - М.: Колос, 1978, с. 34-40.
47. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2018 году. - М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020 г. - 340 с.
48. Дубенок, Н. Н. Современные гидромелиоративные системы / Н. Н. Дубенок, К. Б. Шумакова, С. О. Владимиров. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023.–195 с.
49. Дубенок, Н.Н. Влияние тепло- и влагообеспеченности на режимы орошения при капельном поливе саженцев плодовых культур / Н.Н. Дубенок, А.В. Гемонов, А.В. Лебедев // Орошаемое земледелие. – 2024. – № 1(44). – С. 9-14.

50. Дурдыбаев С. Д. Переработка и очистка навозных стоков в биологических прудах: // Зоотехника, 1992, №2, с. 24--27.
51. Душкин С.С. Улучшение технологии очистки природных и сточных вод –Харьков –Высшая школа -2008 г. -168 с.
52. Евграфов, А. В. Методы оценки влияния рекультивации торфяников с комплексом машин на теплофизические свойства почв: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Евграфов Алексей Владимирович, 2023. – 255 с.
53. Евграфов, А. В. Особенности формирования поверхностного стока при поливе дождеванием в агроландшафтах Нечерноземья / А. В. Евграфов, М. В. Климахина, Е. В. Мацыганова // Мелиорация и водное хозяйство. – 2013. – № 4. – С. 13-16.
54. Евграфов, А. В. Оценка пригодности возвращения в сельскохозяйственный оборот земель Нечерноземной зоны / А. В. Евграфов, С. И. Харитонов, А. Ю. Кульчев // Сельский механизатор. – 2023. – № 10. – С. 2-4.
55. Евграфов, А. В. Оценка санитарно-экологического и эпидемиологического состояния почв, вовлекаемых в оборот сельскохозяйственных земель Нечерноземной зоны / А. В. Евграфов, С. И. Харитонов, А. Ю. Кульчев // Научные подходы к современному развитию мелиорации земель: Сборник научных трудов / Рассмотрено и одобрено на Ученом Совете ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова». – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2023. – С. 302-312.
56. Евграфов, А. В. Утилизация животноводческих стоков с целью повышения плодородия земель / А. В. Евграфов, С. И. Харитонов // Научно-методическое обеспечение развития мелиоративно-водохозяйственного комплекса: Сборник научных трудов. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2020. – С. 62-67.
57. Евграфов, А. В. Экономическая эффективность использования экологически безопасного комплекса противоэрозионных мероприятий на

склоновых землях / А. В. Евграфов, М. В. Калимахина // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2008. – № 5-1(30). – С. 67-69.

58. Евдокимова Г.А. Накопление нитратов в растениях на почвах с повышенным содержанием тяжелых металлов // Почвоведение, 1993 г., № 8. - С. 104-107.

59. Емельянова Т. В., Гренда С. Г. Содержание подвижного азота в почве и урожай многолетних трав в зависимости от доз азотных удобрений.: / Севообороты и зональные технологии возделывания сельскохозяйственных культур. // Иркутское изд-во, 1986(87), с. 30-36.

60. Ефимов В. Н., Степанова Л. И. Использование многолетними травами азота почвы и удобрений: / Приёмы получения высоких урожаев полевых культур на северо-западе Нечернозёмной зоны. // М.: ВНИИСВ, 1992, с. 54- 57.

61. Журавлева, Л.А. Влияние пространственной неоднородности свойств сельскохозяйственных полей и рельефа на эффективность применения дифференцированных агротехнологий / Л. А. Журавлева, Д. М. Бенин, Н. В. Гавриловская. – Москва: Российский государственный аграрный университет, 2024. – 122 с.

62. Завалин А. А. Удобрение сельскохозяйственных культур на осушаемых минеральных почвах. - М.: ВИУА, 1995. - 138 с.

63. Закономерности загрязнения донных отложений водных объектов тяжёлыми металлами / Н. В. Коломийцев, Г. Ю. Толкачев, Б. И. Корженевский, Т. А. Ильина. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2023. – 180 с.

64. Ионова О. Н. Баланс меченного ¹⁵N азота удобрений под различными культурами в лизиметрическом опыте: Автореф. дисс. канд. наук. - М., 1986. - 17 с.

65. Использование органических отходов животноводческих комплексов для повышения плодородия земель сельскохозяйственного

назначения / В. А. Шевченко, А. М. Соловьев, Г. И. Бондарева, Н. П. Попова. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2022. – 181 с.

66. Использование сточных вод и навозных стоков на орошение и удобрение сельскохозяйственных угодий. - М.: ВНИИГиМ, 1985. - 213 с.

67. К вопросу об обеспечении безопасности транспортных процессов в АПК / О. П. Андреев, В. Г. Тихненко, А. С. Гузалов, А. В. Куриленко // Наука, образование и бизнес: новый взгляд или стратегия интеграционного взаимодействия: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения первого Президента Кабардино-Балкарской Республики Валерия Мухамедовича Кокова, Нальчик, 14–15 октября 2021 года. Том Часть 2. – г. Нальчик: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова", 2021. – С. 212-216.

68. Кашутина Е.А. Моделирование межгеосистемных различий влагопереноса в почве - растительности - атмосфере лесостепи / Е.А. Кашутина, А.Н. Кренке // Доклады VI Гидрологического Съезда. 28 сентября - 1 октября 2004 г. Санкт-Петербург. Секция № 5. Гидрофизические явления и процессы. Формирование и изменчивость речного стока, гидрологические и водохозяйственные расчеты. СПб, 2006. С. 16 - 21.

69. Климахина, М. В. Моделирование сезонного изменения плотности почв в Нечерноземной зоне Российской Федерации /М. В. Климахина, А. В. Евграфов // Природообустройство. – 2010. – № 5. – С. 25-29.

70. Коломийцев Н. В., Корженевский Б. И., Ильина Т. А., Гетьман Е. Н. Оценка техногенной нагрузки на водные объекты по загрязненности донных отложений // Мелиорация и водное хозяйство. 2015. № 6. С. 15-19.

71. Колосова А. В. Многолетние травосмеси для кормовых севооборотов Нечернозёмной полосы. - М.: Сельхозгиз, 1955. - 96 с.

72. Корженевский Б.И. Факторы миграции тяжелых металлов в водные объекты и на сопредельных территориях // Международный технико-экономический журнал, 2019 г., № 4. - С. 38-44.
73. Корягина А. А. / Микробиологические основы повышения плодородия почв. // Минск: Наука и Техника, 1984. - 181 с.
74. Костяков А. Н. Основы мелиорации. - М.: Сельхозгиз, 1960. - 622 с.
75. Кульчев, А. Ю. Моделирование изменения гранулометрического состава дерново-подзолистых окультуренных почв /А. Ю. Кульчев, А. К. Боровая // Ломоносов-2023: Тезисы докладов XXX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 11–13 апреля 2023 года / Сост.: А.А. Астайкина, Л.А. Поздняков, А.А. Бобрик, В.А. Кузнецов. – Москва: ООО "МАКС Пресс", 2023. – С. 154-155.
76. Лапшина Н. А., Никулкин Н. В. Технология орошения кормовых культур животноводческими стоками в совхозе им. Лакина Владимирской области. /Прогрессивные технологии и технические средства сельскохозяйственного использования сточных вод и животноводческих стоков //- М.: ВНИИСВ, 1984, с. 7-12.
77. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло и массопереноса. - Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. - 564 с.
78. Лысенко П. Ф. Внутрипочвенное внесение бесподстилочного навоза на луговых угодьях: /Прогрессивные технологии и технические средства сельскохозяйственного использования сточных вод и животноводческих стоков. // - М.: ВНИИСВ, 1984, с. 62.-66.
79. Мажайский, Ю. А. Анализ влияния антропогенных факторов на природные ландшафты и методы их локализации / Ю. А. Мажайский, Ю. А. Блохова, А. Г. Карпухов //Материалы I Белорусского географического конгресса: Материалы конгресса к 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 70-летию Белорусского географического общества. В 7-ми частях, Минск, 08–13 апреля 2024 года. – Минск: Белорусский государственный университет, 2024. – С. 193-198.

80. Максимов Д. С. Агротехника высоких урожаев многолетних трав. - М.: Россельхозиздат, 1986. - 176 с.
81. Марков Е. С. Сельскохозяйственные и гидротехнические мелиорации. - М.: Колос, 1981, с. 238-264.
82. Марон И. А. Дифференциальное и интегральное исчисление в примерах и задачах. - М.: Наука, 1970. - 399 с.
83. Марымов В. И. Сточные воды на полях орошения. - М.: Колос, 1993, с. 42-86.
84. Математические модели контроля загрязнения воды \ ред. Джеймс А. \ - М.: Мир, 1981. - 471 с.
85. Машаускене А., Куджюлис Л. Влияние азотных удобрений на химический состав урожая многолетних бобовых и злаковых трав. - Тр.\ Лит. НИИ земледелия, 1980, т. 24, с. 148-160.
86. Медведев Г. А. Многолетние травы при орошении. - М.: Росагропромиздат, 1989. - 176 с.
87. Медведев С. С. Превращения азотных веществ в растениях и почве. - Тр. / НИИ ЛГУ им. Жданова, 1988, № 39, с. 163-87.
88. Меньшин В. К., Боев В. А., Боева Т. М. Качество зелёных и консервированных кормов при использовании азотных удобрений: / Рациональное производство кормов в скотоводстве //Москва - Ульяновск, 1988, с. 102-103.
89. Мёрзлая Г. Е. Орошение пастбищ сточными водами. - М.: Россельхозиздат, 1976. - 125 с.
90. Методика разработки рекомендаций по применению удобрений с помощью ЭВМ. - М.: ВИУА и ТСХА, 1990. - 125 с.
91. Методические положения по обоснованию количественных характеристик элементов водного баланса при регулировании режимов влажности почвы на осушительно-увлажнительных системах /С. А. Меньшикова, В. П. Максименко, А. В. Евграфов, Т. Л. Волчкова // Основные результаты научных исследований института за 2018 год: Сборник научных

трудов. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2019. – С. 215-221.

92. Методы оценки степени деградации сельскохозяйственных земель: научное издание ФГБНУ ВНИИ «Радуга». - Коломна: ИП Воробьев О.М., 2015 г. - 32 с.

93. Мишустин Е. Н., Шильникова В. К. Биологическая фиксация атмосферного азота. - М.: Наука, 1968. - 531 с.

94. Мнухин А.Г. Брюханов А.М. Обеззараживание поверхностных и сточных вод с помощью электрогидравлического воздействия. Водоснабжение и санитарная техника – 2002 -№11-с. 18-19

95. Накопление органического углерода и общего азота в пахотном слое почвы при разноглубинной заделке органических остатков /В. А. Шевченко, А. М. Соловьев, Г. И. Бондарева, Н. П. Попова // Научные подходы к современному развитию мелиорации земель: Сборник научных трудов / Рассмотрено и одобрено на Ученом Совете ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова». – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2023. – С. 404-413.

96. Научное обоснование и практическая реализация вовлечения в оборот залежных земель нечерноземной зоны Российской Федерации и восстановления их плодородия / В. А. Шевченко, Л. В. Кирейчева, С. А. Новиков [и др.]. – Москва: Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, 2024. – 490 с.

97. Новикова Н.М. Ответные реакции экосистем на изменение водного режима территорий в степной зоне / Н.М. Новикова, Н.А. Волкова, С.С.Уланова, И.Б. Шаповалова, А.А. Вышивкин // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17. № 3 (48). С. 38 - 48.

98. Новые способы повышения продуктивности деградированных мелиорированных земель с применением информационных технологий / А. В. Ильинский, Н. В. Коломийцев, А. В. Матвеев [и др.]. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2022. – 152 с.

99. Овцов Л. П., Соколов С. В. Влияние подготовки навозных стоков к орошению на долговечность оросительной сети из стальных труб.: / Технология и эффективность применения сточных вод животноводческих стоков в сельском хозяйстве. - М.: ВНИИГиМ, 1988, с. 3-8.

100. Оношко И. П. Азот и его минеральные формы в ландшафтах Белоруссии. - Минск: Наука и Техника, 1990, с. 19- 37.

101. Оперативный мониторинг на осушительно-увлажнительных системах /В.В. Бородычев, В. Максименко, А. Н. Николаенко [и др.] //Экологический мониторинг мелиорированных земель и мелиоративных систем. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2018. – С. 87-155.

102. Оптимизация водного и азотного режимов почвы / Под ред. Судиничина И. И., Уварова М. М. // - М.: Изд-во МГУ, 1988. - 173 с.

103. Оптимизация систем водоподготовки и мелиорации сельскохозяйственных культур на территориях, отдаленных от водных объектов и крупных водопроводных систем / Д.Ю. Мартынов, А.И. Новиченко, А.В. Евграфов [и др.] // Научное обозрение. – 2016. – № 16. – С. 46-55.

104. Орошаемые культурные пастбища. /ред. Андреев Н. Г. //- М.: Агропромиздат, 1992, с. 15-28.

105. Оценка выбывших из оборота сельскохозяйственных земель Нечерноземной зоны по категории загрязнения /Г. И. Бондарева, А. В. Евграфов, С. И. Харитонов, А. Ю. Кульчев // Сельский механизатор. – 2022. – № 5. – С. 26-27.

106. Патент № 2767075 С1 Российская Федерация, МПК С05F 3/00, С05F 11/02. Способ утилизации жидкой фракции животноводческих стоков: № 2021121743: заявл. 22.07.2021: опубл. 16.03.2022 / С. И. Харитонов, В. А. Шевченко, Г. И. Бондарева, А. В. Евграфов; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова".

107. Пачепский Я. А., Мироненко Е. В. /Нахождение константы

кинетики денитрификации по данным миграции нитратов в почвенных колонках. // Агрохимия, 1982. №11, с. 35-43.

108. Пащенко Р. Д., Старкова О. П., Аргучанова З. И., Юрьева В. К. Влияние длительного применения жидкой фракции бесподстилочного навоза на плодородие почвы и урожай кукурузы. /Прогрессивные технологии и технические средства сельскохозяйственного использования сточных вод и животноводческих стоков // - М.: ВНИИСВ, 1984, с. 80- 84.

109. Перельман А. И. Геохимия ландшафтов. - М.: Высшая Школа, 1975, с. 5-355.

110. Переработка и использование птичьего помёта. Методические рекомендации. - Харьков: 1975, с. 3. . .11.

111. Плюсин И. И., Голованов А. И. Мелиоративное почвоведение. - М.: Колос, 1983, с. 50-60.

112. Подзолистые почвы Северо-запада Европейской части СССР. - М.: Колос, 1979, с. 156-239.

113. Почвенно-геологические условия Нечерноземья. - М.: Изд-во МГУ, 1984. - 608 с.

114. Почвы Европейского-Северо-Востока и их плодородие. - Ленинград: Наука, 1989, с. 13.

115. Практикум по почвоведению. - М.: Агропромиздат, 1986, с. 210-218.

116. Предотвращение деградации почв и охрана природной среды для условий сухостепной зоны Республики Крым: Научно-практические рекомендации / В. А. Шевченко, А. М. Соловьев, Г. И. Бондарева [и др.]. – Москва: Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2023. – 34 с.

117. Применение птичьего помёта на удобрение. Рекомендации. - Жодино: изд-во Министерство с/х БССР, 1982. - 30 с.

118. Проблема загрязнения речных вод, повышение качества сбрасываемых загрязненных вод при эксплуатации гидромелиоративных систем / К. С. Семенова, М. В. Климахина, А. М. Бакштанин [и др.]. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Амирит", 2023. – 160 с.

119. Работоспособность технических систем: Учебник для ВУЗов по изучению дисциплины / С. К. Тойгамбаев, О. Н. Дидманидзе, А. С. Апатенко [и др.]. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – 379 с.
120. Рекомендации по мелиоративному освоению и использованию земель под сенокосы и пастбища. - М.: Изд-во Союзгипроводхоз, с. 52-66.
121. Рекомендации по предотвращению деградации почв и охране окружающей природной среды для условий сухостепной зоны России : научно-практические рекомендации / В. А. Шевченко, А. М. Соловьев, Г. И. Бондарева [и др.]. – Москва: Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, 2023. – 40 с.
122. Розенбилт Б. Д. Отчёт о НИР. Охрана окружающей среды от загрязнения животноводческими стоками. - М.: Мосгипрониисельстрой, 1989.
123. Самарина В. С. Гидрогеохимия. - Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1977. - 359 с.
124. Самарский А. А. Теория разностных схем. - М.: Наука, 1977. - 656 с.
125. Сельскохозяйственное использование сточных вод. Справочник. / под ред. Овцова Л. П., Игнатовой В. В., Элика Э. Е. // М.: Росагропромиздат, 1989, с. 7-32.
126. Семенова Е.И. и др. Содержание тяжелых металлов в почве после распашки залежи первой стадии сукцессии / Е.И. Семенова, В.И. Титова, И.О. Митянин //Международный научно-исследовательский журнал, 2020 г., № 01(91). - С. 108-113.
127. Семенова, К. С. Противопожарное шлюзование осушенных торфяников в условиях Мещерской низменности / К. С. Семенова. – Саратов: Общество с ограниченной ответственностью "Амирит", 2023. – 124 с.
128. Серегина, Т. А. Применение активаторов роста и органического мелиоранта при возделывании картофеля на серых лесных почвах / Т. А. Серегина, О. В. Черникова, Ю. А. Мажайский // АгроЭкоИнфо. – 2023. – № 1(55).

129. Спирина В.З., Соловьева Т.П. Агрехимические методы исследования почв, растений и удобрений: учеб. пособие. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014 – 336 с.

130. Справочник по кормопроизводству. - М.: Агропромиздат, 1985. - 412 с.

131. Стоноженко Л.В., Югов А.Н., Карминов В.Н. Применение MS Excel и Statistica for Windows для лесотаксационных вычислений и обработки экспериментальных данных методами математической статистики: учеб. пособие. – М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2012 – 88 с.

132. Сутягин В.П., Туликов А.М., Сутягина Т.И. Системный анализ энергетических потоков в земледелии: учебное пособие для дипломного проектирования. - Тверь: «Агросфера» Тверской ГСХА, 2008 г. - С. 37-39.

133. Технологии и технические средства повышения продуктивности сельскохозяйственных земель комплексными мелиорациями: /Л. В. Кирейчева, И. Ф. Юрченко, Н. П. Карпенко [и др.]. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2022. – 218 с.

134. Толкачев, Г. Ю. Мониторинг загрязнения донных отложений тяжелыми металлами для различных водных объектов верхней Волги / Г. Ю. Толкачев, Б. И. Корженевский, Н. В. Коломийцев // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2023. – № 3. – С. 65-75.

135. Толкачев, Г. Ю. Принципы мониторинга водных объектов для изучения процессов и явлений при восстановлении плодородия почв и рекультивации деградированных мелиорированных земель / Г. Ю. Толкачев, Б. И. Корженевский, Н. В. Коломийцев // Безопасность жизнедеятельности. – 2022. – № 7(259). – С. 37-43.

136. Тюльдюков В. А., Савенков А. Н. Оптимизация водного и пищевого режимов при использовании многолетних трав /Обзорная информация // - М.: ТСХА, 1984.

137. Управление водным режимом мелиорируемых сельскохозяйственных земель. /С.Ф. Аверьянов. Под общей редакцией Ю.Н.

Никольского. М.: Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015- 542 с.

138. Усманов Р.З. Экологическая оценка и научные основы восстановления природного потенциала деградированных почв Северо-Западного Прикаспия. / Автореферат диссертации доктора биологических наук. - Махачкала, 2009 г. - 46 с.

139. Филимонов Д. А., Руделёв Е. В. / Потери азота удобрений и почвы при вымывании на основных почвенных разностях Нечернозёмной зоны // Круговорот и баланс азота в системе почва - удобрение - растение - вода. - М.: Наука, 1979, с. 130- 135.

140. Цифровые технологии проектирования процессов в АПК / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова [и др.]. – Москва: Российский государственный аграрный университет- Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2023. – 172 с.

141. Черникова, О. В. Оксиредуктазы оподзоленного чернозема, загрязненного тяжелыми металлами, при его санации / О. В. Черникова, Ю. А. Мажайский // Развитие современных систем земледелия и животноводства, обеспечивающих экологическую безопасность окружающей среды: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 110-летию Пермского НИИСХ, Пермь, 05–07 июля 2023 года / Науч. редколлегия: К.Н. Корляков [и др.]. – Пермь: Издательство "От и До", 2023. – С. 154-159.

142. Шагаипов, М. М. Рациональное использование природных земель сельскохозяйственного назначения для повышения урожайности в Российской Федерации /М. М. Шагаипов, Х. Х. Эсхаджиева, Н. З. Шамсутдинов // Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. – 2023. – № 3(57). – С. 12-15.

143. Шевцов Н. М. Внутрипочвенная очистка и утилизации сточных вод. - М.: Агропромиздат, 1988, с. 2-24.

144. Шевченко В.А., Бородычев В.В., Бондарева Г.И. и др. «Оценка биологических особенностей сельскохозяйственных культур. Структура севооборотов на вводимых в оборот мелиорированных землях Нечерноземной

зоны России. - М.: ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», 2020 г. - 51 с.

145. Яшалова Н.Н., Молчанова Т.К., Рубан Д.А. Предпосылки эффективного управления климатическими рисками в сельском хозяйстве России: инвестиционно-инновационный аспект //Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление, 2019. Т. 18, № 5. - С. 637-655. -.

146. Albrecht W. A., Crahan E. R., Shipard A. R. Surface relationships of roots and colloidal clay plant nutrition. - Amer. J. Bot. 29, 1942, p. 210- 213.

147. Al Abbas H., and Barber S. A. The effect of root growth and mass flow on the availability of soil calcium and magnesium to soybeans in a greenhouse experiment. - Soil Sci 27, 1981, p. 103-107.

148. Barber S. A. Soil nutrient bioavailability a mechanistic approach. - A. Wiley interscience publication John Wiley & Sons Inc., 1984, p. 114-137.

149. Bergstrom L. Johnsson H. & Torstensson G. Simulation of soil nitrogen dynamics using the SOILN model. - Fertilizer Research 27, Netherlands, 1991, p. 181-188.

150. Bondareva, G. I. Metrological support characteristics for life cycle of agricultural machines / G. I. Bondareva, A. V. Evgrafov, A. Yu. Ermolaeva // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, 04 марта 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 1515. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 42087.

151. Bouldin D. R. Mathematical description of diffusion processes in the soil - plant system. - Soil Sci. Soc. Amer. Roc 25, 1961, p. 476-480.

152. Claassen N. and Barber S. A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and the flux into roots of intact plants. - Plant Physiol 54, 1974, p. 564-568.

153. Claassen N. and Barber S. A. Simulation model for nutrient uptake from soil by a growing plant roots system. - Agron. J. 68, 1976, p. 961-964.

154. Gabon F., Girard G. & Ledoux E. Modeling of the nitrogen cycle in farm land area. - Fertilizer Research 27, Netherland, 1991, 161- 169.

155. Kerong Z., Haishan D., Shuduan T., Zhixi W., Quanfa Z. Vegetation

community and soil characteristics of abandoned agricultural land and pine plantation in the Qinling Mountains // *Forest Ecology and Management*, 2010. V. 259. - P. 2036-2047.

156. Khalid Muhammad, Zahir Ahmad Zahir, Azhar Waseem and Muhammad Arshad Azotobacter and L-tryptophan Application for Improving Wheat Yield // *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 1999. V. 2, № 3. - P. 739-742.

157. Lopez B.N., Man Y.B., Zhao Y.G., Zheng J.S. et al. Major pollutants in soils of abandoned agricultural land contaminated by e-waste activities in Hong Kong // *Arch Environ Contam Toxicol*, 2011. V. 61. - P. 101-114 -.

158. Mark J., Hammer L. *Water and Waster - Water Technology*. - Jonh Wiley & Sons, Inc, New York - London - Toronto, 1979, p. 240-397.

159. Misra C., Nilsen D. R., Biggar I. N. Nitrogen transformation in soil during leaching. - *Pros. Soil Science Society of America*, vol 38, N 2, 1974, p. 283-289.

160. Mueller G., Ottenstein R., Yahya A. Standardized particle size for monitoring, inventory, and assessment of metals and other trace elements in sediments: $< 20 \mu\text{M}$ or $< 2 \mu\text{M}$? // *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001. Volume 371, № 5. - P. 637-642.

161. Nilsen D. R., Strarr I. L. Nitrogen transformations during continuous leaching. - *Pros. Soil Science Society of America*, vol 38, N 2, 1974, p. 292-301.

162. Nissen, Per. 1973. Multiphasic ion uptake in roots. In W. P. Anderson, Ed. *Ion Transport in Plants*. Academic Press, New York. Pp. 539-553.

163. Nye P. H., and Tinker P. B. 1977. *Solute Movement in the Soil - Root System*. - Blackwell Scientific Publishers, Oxford, England.

164. Ramos C. & Carbonell E. A. Nitrate leacheng and soil moisture prediction withe the LEACHM model. - *Fertilizer Research* 27, Netherland, 1991, p. 171-180.

165. Ricci J.M.P., Conrad E. Exploring the feasibility of setting up community allotments on abandoned agricultural land: a place, people, policy approach // *Land Use Policy*, 2018. V. 79. - P. 102-115. -.

166. Rolston D., Marino M. Simultaneous transport of nitrate and gaseons denitrification products in soil. - *Pros. Soil Science Society of America*, vol 40, N 6,

1976, p. 160-165.

167. Selim N. M., Ickander I. K. Nitrogen behavior in land treatment of waste water: a simplified model. "State of knowledge in land treatment waste water." Int. Symp. Ang., p. 171-179.

168. Sumon L. Heavy metal phytoextraction capacity of several agricultural crops plant species // Proc. Extend. Abstracts 5th Inter. Conf. Biogeochem. Trace Elements, July 11-15, 1999. - Vienna, Austria, 1999. V. II. - P. 892-893.

169. Wilson J. L., Gelhar L. W. Dispersion mixing in partially saturated porous medium. - Mit. Ralph. M. Parsons Lab. Water Resour. And Hydrogyn. Rept., 1974. - 353 p.

170. Wong J.W.C., Chen Q., Zhang F.S. et al Phytostabilization of mimicked cadmium contaminated soil with lime amendment // Ibidem, 1999. V. 1. - P. 898-899.

Монография

О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов, Н.Н. Пуляев,
А.С. Гузалов, Д.А. Филимонов, А.В. Куриленко

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ СТОКОВ НА ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКИХ ПОЛЯХ ОРОШЕНИЯ

Материалы издаются в авторской редакции

Подписано в печать 02.09.2024. Формат 60×90/16.
Усл.-печ. л. 10,25. Тираж 100 экз.

Заказ № 37365

Отпечатано в типографии «OneBook.ru»
ООО «Сам Полиграфист»
129090 г. Москва, Протопоповский пер., 6
www.onebook.ru