

УДК 631.6

DOI: <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2024-1-21-40>

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ, НАКОПЛЕНИЯ
ВЛАГИ И ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛИЗИМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ФНЦ «ВИК ИМ. В.Р. ВИЛЬЯМСА»**

Н.Н. Гречишников, кандидат сельскохозяйственных наук

И.А. Трофимов, доктор географических наук

ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»

141055, Россия, Московская область, г. Лобня, ул. Научный городок, корп. 1

viklizimetr@mail.ru

**STUDY OF PATTERNS OF MOVEMENT, ACCUMULATION OF MOISTURE
AND CHEMICALS IN AGROECOSYSTEMS BASED ON THE RESULTS
OF LYSIMETRIC STUDIES OF THE FEDERAL WILLIAMS RESEARCH
CENTER OF FORAGE PRODUCTION & AGROECOLOGY**

N.N. Grechishnikov, Candidate of Agricultural Sciences

I.A. Trofimov, Doctor of Geographical Sciences

Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology

141055, Russia, Moscow region, Lobnya, Nauchnyi gorodok str., k. 1

viklizimetr@mail.ru

Лизиметрические исследования проводились на лизиметрической станции ВНИИ кормов в разные годы в агроэкосистеме «приземный слой воздуха — растение — почва — инфильтрационный сток». Эти исследования очень ценятся в нашей стране и в мире. Они привлекают внимание отечественных и зарубежных исследователей. С помощью лизиметрических исследований в кратчайшие сроки можно контролировать состояние и развитие растений, динамику состояния почв, темпы ухудшения плодородия почв, предвидеть и предотвратить возможное заболачивание орошаемых угодий. Лизиметрические исследования позволяют определить качество оросительной воды, а также, с учетом биологии растений и гидрологии участка, установить оптимальный срок и норму полива. Обоснованные, благодаря лизиметрам, нормы орошения повышают и эффективность удобрений, максимально вовлекая при этом в круговорот содержащиеся элементы питания не только вносимых удобрений, но и почвы. Мобилизация усвоения растениями основных элементов питания (N, P, K, Ca) позволяет также снизить потери за счет вымывания. Полученные результаты позволяют рассчитать баланс питательных элементов в почве и выбрать лучшие культуры и системы удобрений, обеспечивающие оптимальную продуктивность сельскохозяйственных угодий и воспроизводство плодородия почв.

Ключевые слова: почва, растения, баланс питательных элементов, контроль состояния.

Lysimetric studies were carried out at the lysimetric station of the Institute in different years in the agroecosystem "surface layer of air — plant — soil — infiltration runoff". These studies are highly appreciated in our country and in the world. They attract the attention of domestic and foreign researchers. With the

help of lysimetric studies, it is possible to monitor the condition and development of plants, the dynamics of soil condition, the rate of deterioration of soil fertility, to anticipate and prevent possible waterlogging of irrigated lands in the shortest possible time. Lysimetric studies make it possible to determine the quality of irrigation water, establish the optimal irrigation period and rate, taking into account plant biology and hydrology of the site. Irrigation norms justified by lysimeters increase the efficiency of fertilizers, while maximally involving in the cycle the contained nutrients not only of the applied fertilizers, but also of the soil. Mobilization of plants' assimilation of basic nutrients (N, P, K, Ca) also allows to reduce losses due to leaching. The results obtained allow us to calculate the balance of nutrients in the soil and choose the best crops and fertilizer systems that ensure optimal productivity of agricultural land and reproduction of soil fertility.

Keywords: soil, plants, nutrient balance, condition control.

Множество разноплановых лизиметрических исследований проведено на лизиметрической станции ВНИИ кормов в разные годы в агроэкосистеме «приземный слой воздуха—растение—почва—инфильтрационный сток». Эти исследования очень ценились в нашей стране и в мире. Они привлекали внимание отечественных и зарубежных исследователей. Лизиметрическая станция стала одним из выдающихся достижений ВИК и объектов показа приезжающим ученым и руководителям (рис. 1–10).

Одни исследователи сменялись другими, но актуальность лизиметрических исследований, совместного изучения водного баланса и баланса химических веществ всегда была очень высокой.

Важность и необходимость изучения процесса вымывания питательных ве-

ществ из почвы на пастбищах и сенокосах связаны с решением таких проблем, как сохранение плодородия почвы в условиях интенсификации луговодства и охрана окружающей среды, что на мелиорируемых землях связано с экологической безопасностью дренажного стока.

Вымывание питательных элементов на пастбище при регулировании водного и пищевого режимов почвы изучали с помощью лизиметрических поддонов, установленных на глубине 70 см в середине между дренами. Количество инфильтрата в годы исследований мало зависело от видов и норм удобрений, а изменялось больше в зависимости от естественного увлажнения. Содержание элементов питания в инфильтрате зависело от вносимых удобрений и погодных условий.



Рис. 1. XII Международный конгресс по луговодству. Советская делегация на лизиметрической станции, 1974 г.



Рис. 2. XII Международный конгресс по луговодству.
Американская делегация на лизиметрической станции, 1974 г.



Рис. 3. Общее собрание коллектива ВИК.
Знаменосец Б.И. Коротков, заведующий лизиметрической станцией, 1978 г.



Рис. 4. XII Международный конгресс по луговодству.
Директор ВИК М.А. Смурыгин (в центре) с делегацией руководящих работников на прудах орошения рядом с лизиметрической станцией.
Крайний слева Б.И. Коротков, заведующий лизиметрической станцией, 1974 г.



Рис. 5. Директор ВИК М.А. Смурыгин (в центре) с делегацией руководящих работников на прудах орошения рядом с лизиметрической станцией, 1974 г.



Рис. 6. Вид с лизиметрической станции на орошаемые пастбища, 1974 г.



Рис. 7. Общий вид лизиметрической станции, 1974 г.



Рис. 8. XII Международный конгресс по луговодству.
Б.И. Коротков, заведующий лизиметрической станцией
и директор ВИК М.А. Смурыгин (в центре) с делегацией руководящих работников
на лизиметрической станции, 1974 г.



Рис. 9. Б.И. Коротков, заведующий лизиметрической станцией (в центре)
с делегацией ученых на орошаемых пастбищах рядом с лизиметрической станцией, 1974 г.



Рис. 10. Ведущие ученые лаборатории орошаемого луговодства и лизиметрических исследований: Коротков Б.И. (первый слева), Яценко Н.А. (третья слева), Дикарев В.Г. (первый справа), Лавров С.С. (второй ряд) на лизиметрической станции, 1990 г.

На разновозрастных злаковых травостоях в условиях двухстороннего регулирования водного режима дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы концентрация общего и нитратного азота в растворах увеличивалась в вегетационный период и снижалась в зимние и весенние периоды. При этом внесение полного минерального удобрения ($N_{240}P_{60}K_{120}$) способствовало большему их вымыванию.

Концентрация общего азота под неудобренными травостоями равна 2,2, нитратного — 1,3, при внесении полного удобрения соответственно 3,6 и 1,8 мг/л. Большие потери азота наблюдались в невегетационные периоды с хорошей теплообеспеченностью. Это обусловлено тем, что в теплую погоду интенсивно идут процессы нитрификации и азот, который в основном представлен нитратами, или совсем не может использоваться

(рано весной или поздно осенью), или часть его не успевает использоваться растениями и мигрирует в нижележащие слои почвы, достигая глубины 70 см. При внесении $N_{240}P_{60}K_{120}$ на осушаемом долголетнем пастбище потери кальция по сравнению с контролем снизились на 26%, магния — на 45%, калия — на 36%, фосфора — на 58% [1].

В условиях двухстороннего регулирования наблюдалась подобная закономерность, снижение составило соответственно 26, 38, 37 и 40%. Однако при естественном, как и при дополнительном увлажнении, внесение повышенных доз азотных удобрений увеличивает вымывание азота. Потери общего азота достигают 17 кг, а при орошении — 23–31 кг, нитратного азота соответственно 10 и 18–23 кг/га.

Наибольшие потери питательных веществ происходят в осенние, зимние и

влажные вегетационные периоды. Больше других вымывается кальция и магния, их концентрация в инфильтрате достигает соответственно 88 и 41 мг/л. Потери фосфора, калия, аммиачного азота незначительны.

За годовой цикл внесение минеральных удобрений ($N_{240}P_{60}K_{120}$) способствовало снижению потерь элементов питания на 33,6–40,8%.

На удобренных участках, где урожайность была значительно выше, меньше терялось с лизиметрическими водами: кальция на 126,3 кг/га, магния в 1,8 раза, фосфора на 130%. Однако возросли потери азота, особенно нитратного, который составлял от общих потерь азота 75% и более.

На орошаемом фоне без внесения удобрений меньше вымывалось из почвы: фосфора на 83%, калия на 51%, магния на 111%, однако увеличились потери общего и нитратного азота, особенно в осенне-зимний период, когда концентрация общего азота достигала 8,9–9,7, а нитратного — 5,8–6,6 мг/л.

Концентрация аммиачного азота в инфильтрате на орошаемом участке была выше во все периоды наблюдений.

Внесение полного удобрения ($N_{240}P_{60}K_{120}$) в условиях орошения способствовало снижению потерь кальция, фосфора, калия, аммиачного азота, при этом увеличились потери общего азота на 4,9, нитратного на 4,0 и магния на 19,2 кг/га. Общее снижение потерь равно 143,6 кг/га, или 25%.

Совместное применение полного минерального удобрения и дополнительного увлажнения на осушаемом пастбище на 327,3 кг/га, или на 44% сокращает потери питательных веществ с

инфильтрационными водами. Значительно сокращаются потери кальция, магния, фосфора, калия. Однако увеличиваются, особенно в осенне-зимний период, потери общего и нитратного азота, достигая соответственно 14,1 и 11,4 кг/га [2].

При известковании и внесении полного минерального удобрения наблюдается тенденция к увеличению потерь питательных веществ: больше вымывается магния, кальция, калия.

При совместном внесении минеральных удобрений и навозных стоков потери элементов питания по величине близки потерям при известковании [3].

Вымывание аммиачного азота значительно меньше, чем нитратного. Концентрация его в инфильтрате достигала 0,9 мг/л на неудобренном фоне и 1,1 мг/л при внесении полного удобрения. Максимальные потери происходили в вегетационный период, они равны 2,5–2,7 кг/га. При внесении полного удобрения во все периоды наблюдений вымывалось больше этого элемента по сравнению с контролем (без удобрения). В целом за год на мелиорируемых пастбищах потери аммиачного азота достигали 2,9–3,4 кг/га.

На дерново-подзолистой почве со средней обеспеченностью фосфором и калием вымывание этих элементов питания было незначительным. Наибольшая концентрация фосфора наблюдалась в вегетационный период, она равна 2,8 мг/л, т. е. вымывание этого элемента питания возрастало во время вегетации и достигало 11,7 кг/га.

Наибольшие потери калия наблюдаются также во время вегетации, хотя максимальная концентрация в воде этого

элемента составляла 2,8 мг/л в ранневесенний период.

При внесении полного минерального удобрения ($N_{240}P_{60}K_{120}$) потери фосфора и калия на пастбищах сокращаются. Концентрация фосфора снижается с 2,2 до 1,2 мг/л, калия — с 1,4 до 1,1 мг/л, в 2,4 раза уменьшаются потери фосфора, в 1,6 раза — потери калия по сравнению с неудобренными участками.

В наибольшем количестве во все периоды года в инфильтрате присутствовал кальций. Его концентрация достигала 88,3 мг/л, а годовые потери составили 443,0–541,5 кг/га. При внесении полного удобрения концентрация этого элемента питания снизилась с 87,4 до 76,9 мг/л, годовые потери сократились на 34,5% и составили 366,0 кг/га, т. е. применение удобрений способствовало сохранению кальция в почве. Наибольшее содержание кальция в растворах было в осенне-зимний период, наименьшее — в ранневесенний.

Магния в инфильтрате содержится в 2–3 раза меньше, чем кальция. Наименьшие потери его происходят в осенне-зимний период (97,6 кг/га). Общие потери магния на удобренном пастбище составляют 215,0 кг/га. Внесение $N_{240}P_{60}K_{120}$ снизило эти потери до 118,3 кг/га.

Влияние орошения и удобрений на вымывание питательных веществ под вновь созданным травостоем проявилось иначе, чем под старовозрастным. Общий вынос питательных элементов под молодым и старосеяным травостоями одинаковый, однако удобрения оказали различное влияние на изучаемый процесс.

Размер потерь питательных веществ при внесении полного удобрения

($N_{240}P_{60}K_{120}$) на вновь созданном пастбище увеличился на 13%, в то время как на старосеяном этот прием сокращал потери элементов питания.

При совместном действии орошения и удобрений под молодым травостоем вымывалось больше кальция, магния, аммиачного азота, нитратов, но меньше фосфора.

Наибольшие потери нитратов под молодым травостоем происходят в осенне-зимний период, наименьшее — в вегетационный; аммиачный азот и фосфор больше всего теряются во время вегетации. Самая большая концентрация кальция в инфильтрате отмечена в осенне-зимний период наблюдений. В целом во все периоды наблюдений опасных размеров потерь питательных веществ за счет вымывания на культурных пастбищах не наблюдалось [2].

Были проведены исследования в лизиметрах-сборниках площадью 0,25 м², заполненных монолитами дерново-подзолистой суглинистой и дерново-подзолистой супесчаной почв.

Травостой во всех опытах был одинаковый: ежа сборная + овсяница луговая + тимофеевка луговая, использование четырехкратное.

В качестве удобрений использовали: аммоний сернокислый; кальций азотнокислый; мочевины, в т. ч. с обогащением ¹⁵N; аммиачную селитру, в том числе с обогащением ¹⁵N; суперфосфат, в т. ч. меченый ³²P; хлористый калий.

Установлено, что на суглинистой почве травостой усваивал нитратную форму удобрений лучше, чем на супесчаной.

При орошении и достаточном количестве осадков во влажные годы в кор-

необитаемом слое закрепление азота возрастает, особенно в случае внесения аммиачной формы удобрения. По величине закрепления азота в корнях большой разницы в зависимости от форм азота, орошения или механического состава почвы не обнаружено. Орошение способствует дополнительной мобилизации азота почвы [4].

При достаточной влагообеспеченности на дерново-подзолистой суглинистой почве без внесения аммиачного удобрения было вовлечено почвенного азота от 11 до 105 кг/га по годам. Это объясняется улучшением условий жизнедеятельности почвенной микрофлоры с усилением поглотительной деятельности корневой системы трав.

Исследования, проведенные со стабильным азотом ^{15}N , показали, что использование азота, с учетом прямого действия и последствия, составило 54% в супесчаной и 60% в суглинистой почвах [10].

Баланс азота в почве (на всех типах) после трех лет использования травостоя и при ежегодной подкормке $\text{N}_{240}\text{P}_{60}\text{K}_{180}$ был отрицательным. При этом в самой почве отмечена убыль азота на $83,2 \text{ г/м}^2$, в торфянике (исходное содержание $\text{N } 2,29\%$), на 60 г/м^2 в дерново-подзолистой супесчаной и на 49 г/м^2 в суглинистой почвах (исходное содержание $\text{N } 0,07\%$ и $0,14\%$).

На дерново-подзолистой супесчаной почве подкормка навозными стоками в дозе N_{240} в течение девяти лет обеспечила в почве и агроэкосистеме в целом баланс азота также положительный, соответственно $+19,0$ и $+38,0 \text{ г/м}^2$ [5].

При интенсивном четырехукосном использовании злакового травостоя на

дерново-подзолистой почве с внесением $\text{N}_{240}\text{P}_{60}\text{K}_{120}$ в инфильтрате накапливается нитратного азота в 20–40 раз больше, чем аммиачного. Совместное действие орошения и удобрений способствует уменьшению вымывания азота с 36 до 21 кг/га. Максимальное вымывание общего азота составило на контроле 2,4, при NPK — 56,8, при орошении без удобрений — 6,2, при орошении + NPK — 28,8 кг/га.

Пастбищная травосмесь из ежи сборной, овсяницы луговой, тимopheевки луговой и одновидовые посевы этих трав при внесении $\text{N}_{240}\text{P}_{90}\text{K}_{120}$ и орошении (2–5 поливов по $450 \text{ м}^3/\text{га}$ за сезон) обеспечили в среднем за 5 лет урожайность соответственно 116,1, 112,3, 106,3 и 97,1 ц/га сухого вещества (СВ).

Установлена обратная связь между количеством потребления растениями питательных элементов и их вымыванием. Чем больше выносилось с урожаем N , Ca , Mg , тем меньше их вымывалось из почвы. Максимальный урожай на ежовых травостоях соответствовал наибольшей величине выноса с урожаем азота, фосфора, калия, кальция, магния, который был на 18–25% больше, чем на тимopheечном травостое, где получен минимальный урожай.

Если под тимopheечным травостоем в течение года содержание нитратного азота в инфильтрате превышало предельно допустимый уровень (ПДК) иногда в 3–6 раз, а также наблюдалось повышенное вымывание магния, то под ежовыми травостоями потери общего азота из почвы были в 2,9 раза (33 кг/га), нитратного в 3,7 (19 кг/га) раза меньше. Таким образом, интенсивное использование сеяных агрофитоценозов при внесении

$N_{180-240}P_{60}K_{120}$ и орошении способствует снижению как общих размеров инфильтрации осадков за пределы 70-сантиметрового слоя почвы в 1,1–1,2 раза на суглинках и в 1,4–1,6 раза на супесях, так и мобилизации К, Са, Mg, Fe, Mn.

Размеры вымывания нитратов зависят от видового состава травостоя, степени плодородия и окультуривания дерново-подзолистой почвы, интенсификации использования травостоев [6].

На орошаемом злаковом трехукосном травостое при ежегодном внесении в течение пяти–девяти лет $N_{240}PK$ на дерново-подзолистой почве в агроэкосистеме «почва—растение—инфильтрационный сток» дефицит азота не отмечен, идет накопление азота ежегодно на 21–29 кг/га за счет закрепления его в корневой массе.

При длительном использовании неудобренного азотом злакового травостоя (на фоне PK) баланс азота в агроэкосистеме также положительный (+12,6 в супеси и +18,2 г/м² в суглинке), что можно объяснить интенсивной азотфиксацией свободноживущими микроорганизмами в условиях накопления органики.

При органической системе удобрения, т. е. при подкормке трехукосных злаковых травостоев навозными стоками КРС в дозе N_{240} (ежегодно), при среднем урожае 645 г/м² в сумме за 9 лет в суглинистой почве и в агроэкосистеме в целом отмечен положительный баланс азота, соответственно 35,3 и 70,6 г/м². При этом убыль азота из почвы составила 14,0 г/м², а потери азота на инфильтрацию — 9,5 г/л, или 5% от поступившего в агроэкосистему азота [7].

Исследования по оценке размеров вымывания биогенных элементов на

дерново-подзолистой суглинистой почве при запашке 120 т/га жидкого навоза, эквивалентного $N_{336}P_{204}K_{444}$, и на созданных методом ускоренного залужения многоукосных орошаемых злаковых травостоях показали, что в первый год происходит значительное загрязнение грунтовых вод нитратами. Так, из слоев почвы 0–35 и 0–70 см за первый вегетационный период нитраты проникали в грунтовые воды с концентрацией, превышающей ПДК в шесть раз, за осенне-зимний период — в 6–9 раз, а за ранне-весенний — в 11–12 раз [8].

Установлена опасность загрязнения нитратами грунтовых вод в результате перезалужения и запашки дернины. Концентрация нитратов в первый год на дерново-подзолистой суглинистой почве составила 6–16 мг/л, а на осушенном низинном торфянике — 41–68 мг/л, что в 12–23 раза превышает ПДК в питьевой воде и в 6–11 — в воде для поения скота. Наиболее высокие потери нитратного азота приходятся на период вегетации — 44–77% на дерново-подзолистой суглинистой и 44–84% — на супесчаной почве.

В то же время залужение травами под покров однолетних культур (райграс, рапс яровой и др.) или летнее залужение после уборки однолетних культур на зеленый корм эффективно снижают вымывание нитратов.

Общий баланс азота в агроэкосистеме «почва—растение—удобрение—вода» (за три года) был отрицательным и составил на суглинистой почве 165 кг/га, супесчаной — 225, на торфяной — 323 кг/га. При более длительном использовании (5–9 лет и более) злаковых агрофитоценозов на том же агрофоне за-

крепление азота в корнях в 1,2–2,2 раза превышало убыль азота из почвы, общий баланс в агросистеме стал положительным.

Многолетние исследования по агроэкологической оценке способов биологизации сеяных злаковых интенсивно используемых травостоев, созданных по запаханной бобово-злаковой и злаковой дернине, показали, что между содержанием бобовых компонентов в запаханной дернине и урожайностью травостоя существует прямая зависимость.

Доказано существенное значение органической массы отмерших мелких и крупных корней для формирования урожая трав, концентрации и вымывания нитратного азота, накопления общего азота, кальция. Таким образом, одним из основных направлений в применяемых агротехнических приемах для снижения потерь биогенных элементов из луговых агроэкосистем является оптимизация уровня питания трав в зависимости от разновидностей почвы, условий увлажнения, увеличения продолжительности использования сеяных агрофитоценозов, что способствует формированию более мощной дернины, выполняющей в этом случае роль биологического фильтра [9].

Инфильтрация атмосферных и поливных осадков в грунтовые воды до глубины 1,5 м составляет в засушливые периоды вегетации 91,6 мм, увеличиваясь во влажные до 136,9 мм, за годовой цикл — до 365,8 мм. Инфильтрация осадков в грунтовые воды при уровне их стояния 2,0 м сокращается за вегетационный период втрое, за годовой цикл — в 1,5 раза.

Установлено преобладание инфильтрации над подпитыванием на участках с

УГВ = 1,5 м в средnezасушливые годы при орошении и с УГВ = 2,0 м во влажные годы.

Водопотребление травостоя овсяницы луговой на дерново-подзолистой почве возрастает от орошения на 18,1%. Водопотребление овсяницы меньше, чем ежи на 15%, что равноценно 500–700 м³/га воды, или одному–двум поливам. Травостой овсяницы при УГВ = 1,5 м требует оросительной воды на 400–500 м³/га больше, чем тот же травостой, но при УГВ = 2,0 м.

Потенциальное водопотребление высокоурожайного (90 ц/га СВ и выше) злакового травостоя с преобладанием костреца безостого на аллювиальной почве с УГВ = 2,0 м при нормах азота 240–300 кг/га на фоне РК составляет 541,6 мм, увеличиваясь в средnezасушливые вегетационные периоды до 556,4 мм и снижаясь во влажные холодные до 455,4 мм. При УГВ = 1,5 м водопотребление этого травостоя снижается на 14%. Максимум потребления за год равно 636,7 мм, за период отрастания — 210,1 мм, за декаду — 91,0 мм, за сутки — 9,1 мм, за час — 0,38 мм.

Подпитывание влаги из грунтовых вод усиливается в засушливые периоды вегетации и достигает 34% при УГВ = 2,0 м и 44% при УГВ = 1,5 м от суммарного водопотребления в неорошаемых условиях, 17 и 30% — в орошаемых. Максимум подпитывания характерен для участков с УГВ = 1,5 м и достигает за вегетацию травостоя 227,4 мм, за год — 256,8 мм, за период отрастания — 78,6 мм, за декаду — 37,2 мм, за сутки — 4,2 мм, за час — 0,18 мм. В отличие от аллювиальной в дерново-подзолистой почве подпитывание из грун-

товых вод осуществляется в более высоких размерах при орошении, чем в неорошаемых условиях.

В засушливые годы травостой ежи сборной испаряет 493,1–477,9 мм, а овсяницы — 469,0–416,4 мм. На участке с травостоем ежи сборной в 1,5–2,8 раза больше вовлекается в оборот влаги из грунтовых вод, вследствие чего инфильтрация осадков на глубину 1,5 и 2,0 м уменьшается.

Зависимость водопотребления от испаряемости более устойчива, нежели от дефицита влажности воздуха или температуры воздуха.

Биоклиматические коэффициенты по периодам отрастания (5 периодов) травостоя костреца безостого (доминант) составляет 1,67, 1,79, 1,03, 1,49, 1,47, травостоя овсяницы луговой — 1,16, 1,10, 1,22, 1,12, 1,21 и травостоя ежи сборной — 1,32, 1,24, 1,37, 1,16, 1,29.

Установленные зависимости рекомендуются использовать при назначении сроков и норм полива злаковых травостоев и при проектировании систем орошения в Центральном районе Нечерноземной зоны на природных кормовых угодьях с УГВ глубже 1,5 м.

На основе биоклиматических коэффициентов, коэффициентов подпитывания и использования осадков предложены расчетные оросительные нормы, а также дозы и сроки азотной подкормки для пастбищ с разным видовым составом травостоя для условий средних, средне- и острозасушливых годов в Центральном районе Нечерноземной зоны [1; 4; 10].

Большое значение имеет оптимизация азотного питания травостоев. При внесении N_{95} на фоне РК в инфильтрате

содержалось (в среднем за три годовых цикла) 1,7–2,6 мг/л общего азота, в том числе 0,6 мг/л азота нитратного, при внесении N_{480} — соответственно 9,5–17,8 мг/л и 6,9–13,5 мг/л [5].

Подкормка азотными удобрениями, проведенная с использованием биоклиматических коэффициентов азотопотребления, суть которого состоит в определении расхода (потребления) азота на единицу водопотребления, позволяет снизить потери азота за счет вымывания в вегетационный период на ежовых травостоях в 2 раза (с 14,9 до 7,2 кг/га), овсяницевого — в 2,3 раза (с 28,5 до 12,6 кг/га) [11].

За три года содержание общего азота в почве снизилось в дерново-подзолистой суглинистой и супесчаной почвах на 0,02%, а на торфяной — на 0,13%, что можно объяснить интенсивным процессом «сработки» органического вещества торфа.

В связи с закреплением азота в корневой массе убыль азота в почве возмещалась на 36% в супеси, на 50% в суглинке и на 42% в торфе. Это указывает на ведущую роль дерновообразовательного процесса в закреплении азота в почве.

При трехлетнем использовании злакового травостоя накопление корневой массы составило в супеси — 31 т/га, в суглинке — 30 т/га, в торфяной почве — 18 т/га, запасы азота в них достигают соответственно 217, 248 и 348 кг/га.

Потери азота с инфильтрационным стоком обусловлены влиянием физических свойств почвы и концентрацией азота в инфильтрате. В значительной степени на потери азота влияет водопроницаемость почвы.

По данным ВИК, в дерново-подзолистой супесчаной почве за годовой цикл получен инфильтрационный сток в объеме 327 л/м², в суглинистой — 228 л/м², в торфяной — 192 л/м², или соответственно 35, 21 и 16% от суммы выпавших осадков и проведенных поливов (май 1996 г. — апрель 1997 г.).

На концентрацию азота в инфильтрационном стоке влияют и агрохимические свойства почвы. Например, высокое содержание азота в торфяной почве обуславливает повышенную концентрацию его в инфильтрате, которая в 4–10 раз превышала концентрацию азота в инфильтрате в супесчаной и суглинистой почве и достигала 41–135 мг/л.

Уменьшение потерь азота за счет инфильтрационного стока возможно благодаря оптимизации режима орошения, устраняющего вертикальный сток за счет сокращения избытка воды.

Размеры инфильтрационного стока могут быть уменьшены агротехническим путем — созданием травостоев, отличающихся более экономным водопотреблением и способных создавать большую фитомассу. Например, в засушливый год в орошаемых условиях при урожае овсяницы луговой 1230 г/м² (123 ц/га) расход воды на 1 ц составил 5,8 мм, а при урожае ежи сборной 1284 г/м² (128,4 ц/га) — 5,5 мм. При этом инфильтрационный сток у ежи сборной был 31 мм, а у овсяницы луговой в 1,9 раза больше (59 мм).

На размер инфильтрационного стока оказывает влияние такой агротехнический прием как поддержание УГВ ниже 1,5 м. На осушенных луговых угодьях при уровне грунтовых вод 2,0 м инфильтрационный сток под травостоем

ежи сборной в засушливый год был 5,5 мм, а при УГВ = 1,5 м — в 6,6 раза больше (36 мм), а во влажный — соответственно 152 и 164 мм [10].

Лизиметрические опыты с применением стабильного изотопа ¹⁵N показали, что при внесении за сезон N₂₄₀ на злаковых травостоях с преобладанием ежи сборной может происходить вымывание в незначительных количествах азота почвы, а не удобрений [4].

При подкормке многоукосного травостоя нормой N₂₄₀P₉₀K₁₂₀ в инфильтрационных растворах обнаружено нитратного азота больше, чем на контроле (без удобрений), а также на орошаемом неудобренном участке.

В период весеннего снеготаяния за пределы подзолистого горизонта почвы перемещалось до 35,7 кг/га нитратов на удобренном участке и до 21,1 кг/га — при совместном применении удобрений и орошения. На контроле в это время потери нитратов были в 10 раз меньше.

Под воздействием орошения усиливалась миграция вглубь почвы K₂O, однако в сумме за три года потери его были незначительны (3–6 кг/га). Орошение усиливало вымывание железа и марганца только на неудобренных участках.

Орошение, как и полное минеральное удобрение, способствовало увеличению вымывания из почвы Ca и Mg, что объясняется воздействием ионов калия и аммония на ППК почвы и усилением подвижности этих элементов в случае регулирования водного режима. В среднем за год потери кальция и магния, вместе взятых, с нисходящим током влаги за пределы 35 см составляют 160–230 кг/га [12].

Исследования ВИК показали, что в

сумме за год в грунтовые воды на глубине 150 см под неорошаемым злаковым травостоем попадает 1,8–2,3 кг/га калия, 192–307 — кальция, 169–186 — магния, 1,4–2,0 — цинка, 1,7–2,8 кг/га марганца на аллювиальной почве и соответственно 0,2–0,6 кг/га, 89–106, 38–55, 0,4–1,4, 0,7–1,4 кг/га — на дерново-подзолистой суглинистой почве. В орошаемых условиях на пойменно-луговой почве заметно возрастает выщелачивание марганца, цинка, а кальция и магния на обеих почвенных разностях вымывается больше в 1,5–2,0 раза.

За годовой цикл на каждые 100 м³ влаги (осадки + поливная вода) на пойменно-луговой почве вымывается 195 кг CaCO₃ + MgCO₃ в неорошаемых условиях и 327 кг в орошаемых, а на дерново-подзолистой почве — соответственно 51 и 60 кг, или в 4–5 раз меньше. Декальцирование дерново-подзолистой почвы, в отличие от пойменной, происходит не за вегетационный период, а ранней весной и поздней осенью [4].

Обобщая многолетний опыт проведения широкомасштабных лизиметрических исследований водного баланса и пищевого режима в системе «растение—почва—вода», следует отметить, что именно лизиметрический метод, многообразие применяемых в сочетании лизиметрических устройств, во ВНИИ кормов позволили получить уникальные результаты:

- определены основные статьи водного баланса, водопотребление луговых травостоев при различном уровне грунтовых вод на дерново-подзолистой и аллювиальной почвах;

- изучен баланс азота, макро- и микроэлементов при разных уровнях мине-

ральных и органических удобрений.

Водобалансовые исследования позволили определить, что в условиях Нечерноземной зоны в период активного роста и развития трав (июнь, июль) потребность во влаге увеличивается, а в начале и конце вегетации (май, сентябрь) уменьшается.

Интенсивность водопотребления тесно коррелирует с температурным режимом и зависит от типа травостоя и почвы.

Круглогодичные лизиметрические исследования по водному балансу зоны аэрации, грунтовому питанию, балансу азота и фосфора с использованием радиоизотопов на злаковых травостоях интенсивного использования позволили сформулировать ряд новых научных положений:

- потребность в воде злаковых травостоев возрастает по мере увеличения норм азотного питания и числа отчуждений;

- нормы осушения и орошения дифференцируются по составу травостоя, например, травостой ежи сборной в среднем на 20% требует влаги больше, чем травостой овсяницы луговой;

- с учетом биологии трав и гидрологии участка детализированы и рекомендованы оросительные нормы, гарантирующие сохранение плодородия минеральных почв для центральных областей НЗ;

- установлена тесная связь оптимального водопотребления травостоев с испаряемостью и на этой основе рекомендован несложный, но надежный метод и прибор по назначению сроков и норм полива в производственных условиях — имитатор сроков и норм полива «ИСП-1-ВИК» [13] (рис. 11);

– с целью увеличения эффективности азотного удобрения путем повышения точности и оперативности определения нормы подкормки злаковых растений в процессе их вегетации разработан новый способ азотной диагностики пастбищных травостоев по водопотреблению. На этой основе создан прибор «Имитатор-определитель азотной подкормки орошаемых пастбищ», который позволяет контролировать ход азотопот-

ребления травостоем в конкретных условиях и рассчитать необходимость дополнительной подкормки азотным удобрением травостоя (рис. 12);

– дифференцированный подход к нормам азотной подкормки с учетом водопотребления многократно повышает оперативность выявления необходимости и нормы азотной подкормки, исключает нежелательные накопления нитратов в корме [4; 14].



Рис. 11. Имитатор сроков и норм полива «ИСП-1-ВИК»



Рис. 12. Имитатор-определитель азотной подкормки орошаемых пастбищ

Заключение. В настоящее время все возрастающее значение приобретает проблема рационального природопользования, биологизации и экологизации сельского хозяйства. Для ее решения необходимо использовать лизиметрические исследования.

Они проводились на лизиметрической станции в разные годы в агроэкосистеме «приземный слой воздуха—растение—почва—инфильтрационный сток». Эти исследования очень ценились в нашей стране и в мире. Они привлекали внимание отечественных и зарубежных исследователей. Лизиметрическая станция стала одним из выдающихся достижений ВИК и объектов показа приезжающим ученым и руководителям.

С помощью лизиметрических исследований в кратчайшие сроки можно контролировать состояние и развитие растений, динамику состояния почв, темпы ухудшения плодородия почв, предвидеть и предотвратить возможное заболачивание орошаемых угодий. Лизиметрические исследования позволяют определить качество оросительной воды, а с учетом биологии растений и гидрологии участка установить оптимальный срок и норму полива.

Обоснованные, благодаря лизиметрам, нормы орошения повышают и эффективность удобрений, максимально вовлекая при этом в круговорот содержащиеся элементы питания не только вносимых удобрений, но и почвы. Мобилизация усвоения растениями основных элементов питания (N, P, K, Ca) позволяет также снизить потери за счет вымывания. Снижение размеров миграции солей в нижележащем слое почвы предотвращает опасность загрязнения

окружающей среды, в особенности подземных вод, используемых для питья населением.

При изучении функционирования агроэкосистем большое значение имеют лизиметрические исследования потерь с инфильтрационными водами биогенных химических элементов, постоянно входящих в состав организмов и выполняющих определенные биологические функции. Элементы и их соединения, требующиеся биоте в больших количествах, называют макробиогенными (C, O, N, H, Ca, P, S), а в малых количествах — микробиогенными. Для растений это: Fe, Mg, Cu, Zn, B, Si, Mo, Cl, V, Ca, которые обеспечивают функции фотосинтеза, азотного обмена и метаболическую функцию. Потери питательных элементов изменяются под влиянием различных сельскохозяйственных культур и систем удобрений.

Полученные результаты позволяют рассчитать баланс питательных элементов в почве и выбрать лучшие культуры и системы удобрений, обеспечивающие оптимальную продуктивность сельскохозяйственных угодий и воспроизводство плодородия почв.

В перспективе приоритетными для лизиметрических исследований ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса» являются следующие важнейшие вопросы:

1. Изучение закономерностей передвижения, накопления и трансформации влаги и химических веществ в почвах и агроэкосистемах;

2. Изучение почвенных процессов на микро-, мезо- и макроуровнях структурной организации почв, выявление их свойств и динамики;

3. Исследование загрязнения почв и

экосистем техногенными выбросами промышленных и сельскохозяйственных предприятий;

При проведении необходимой реконструкции и работ по восстановлению лизиметрическая станция ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса» позволит в полном объ-

еме выполнять полноценные исследования водного, пищевого и других режимов почвы, получать объективные экспериментальные данные по основным направлениям трансформации веществ в экосистеме «приземный слой воздуха—растительность—зона аэрации».

Литература

1. Коротков Б.И., Гречишников Н.Н. Вымывание питательных веществ на пастбищах // Химия в сельском хозяйстве. – 1987. – № 4. – С. 19–22.
2. Гречишников Н.Н. Повышение продуктивности разновозрастных травостоев злаковых пастбищ на мелиорируемых землях Центрального района Нечерноземной зоны : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – М., 1986. – 16 с.
3. Гречишников Н.Н. Плодородие почвы осушаемых злаковых пастбищ при их интенсивном использовании в Центральном районе Нечерноземной зоны // Актуальные проблемы развития научных исследований и инноваций в сельскохозяйственном производстве : сб. докладов Всероссийской науч.-практ. конф. с международным участием. – Белгород, 2023. – С. 50–54.
4. Коротков Б.И. Использование злаковым травостоем элементов питания в условиях Нечерноземной зоны РСФСР // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1981. – № 5. – С. 55–66.
5. Коротков Б.И., Дизенгоф Е.Г. Использование и потери питательных веществ почвы и удобрений на мелиорируемых сенокосах и пастбищах. – М. : ВНИИТЭИСХ, 1985. – 56 с.
6. Семенов Н.А., Яценко Н.А. Лизиметрические исследования луговых агрофитоценозов и почв // Лизиметрические исследования почв : сб. тр. I Всероссийской конференции. – М. : МГУ, 1998. – С. 78–80.
7. Лизиметрические исследования в луговодстве / Н.А. Семенов, Н.А. Муромцев, Г.А. Сабитов, Б.И. Коротков. – Ярославль : АверсПресс, 2005. – 498 с.
8. Коротков Б.И., Веселовски П. Результаты исследований по применению бесподстилочного навоза на мелиорированных сенокосах и пастбищах // Сб. науч. трудов ВИК, вып. 39. – М. : ВИК, 1988. – С. 144–157.
9. Семенов Н.А. Лизиметрическая станция на Луговой // Лизиметрические исследования в России : сб. науч. статей. – М. : НИИСХ ЦРНЗ, 2004. – С. 78–85.
10. Коротков Б.И. Методика и результаты лизиметрических исследований в кормопроизводстве // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1980. – № 4. – С. 130–135.
11. Коротков Б.И., Ермакова Е.Г. Влияние приемов интенсификации лугового кормопроизводства на потери питательных веществ из почвы // Приемы создания и использования высокопродуктивных сенокосов и пастбищ : сб. науч. тр. ВИК, вып. 34. – М., 1986. – С. 127–135.
12. Коротков Б.И. Новые приемы рационального применения поливной воды и азотных удобрений на культурных пастбищах Нечерноземья // Интенсификация лугопастбищного хозяйства : сб. науч. тр. ВИК, вып. 30. – М., 1984. – С. 83–94.
13. А. с. № 912118 (СССР). Способ определения сроков и норм полива / Б.И. Коротков, В.Г. Игловиков, В.Г. Дикарев, И.А. Смурыгин, Е.А. Солопов. Заявлено 08.08.1980, опубл. 15.03.1982, бюл. № 3. – 4 с.
14. Коротков Б.И. Лизиметрические установки на орошаемых землях : инф. листок. – М. : Фил. ГОСИНТН, 1981. – 4 с.
15. Гречишников Н.Н. Экологически безопасное эффективное использование разновозрастных злаковых пастбищ на мелиорируемых почвах Нечерноземной зоны // Актуальные проблемы

почвоведения, экологии и земледелия : сб. докладов XVIII Международной науч.-практ. конф. Курского отделения МОО «Общество почвоведов имени В.В. Докучаева» (Курск, 26–28 апреля 2023 г.). – Курск : ФГБНУ «Курский ФАНЦ», 2023. – С. 57–59.

References

1. Korotkov B.I., Grechishnikov N.N. Vymyvanie pitatel'nykh veshchestv na pastbishchakh [Leaching of nutrients in pastures]. *Himiya v sel'skom hozyaystve* [Chemistry in agriculture], 1987, no. 4, pp. 19–22.
2. Grechishnikov N.N. Povyshenie produktivnosti raznovozrastnykh travostoev zlakovykh pastbishch na melioriruemykh zemlyakh central'nogo rayona Nechernozemnoy zony [Increasing the productivity of grass stands of different ages of cereal pastures on reclaimed lands of the Central region of the Non-Chernozem zone : abstract of the dissertation of the Candidate of Agricultural Sciences]. Moscow, 1986, 16 p.
3. Grechishnikov N.N. Plodorodie pochvy osushaemykh zlakovykh pastbishch pri ikh intensivnom ispol'zovanii v Central'nom rayone Nechernozemnoy zony [Soil fertility of drained cereal pastures with their intensive use in the Central region of the Non-Chernozem zone]. *Aktual'nye problemy razvitiya nauchnykh issledovaniy i innovatsiy v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve : sb. dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Actual problems of the development of scientific research and innovation in agricultural production : collection of reports of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Belgorod, 2023, pp. 50–54.
4. Korotkov B.I. Ispol'zovanie zlakovym travostoem elementov pitaniya v usloviyakh Nechernozemnoy zony RSFSR [The use of nutrition elements by cereal herbage in the conditions of the Non-Chernozem zone of the RSFSR]. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* [Bulletin of Agricultural Science], 1981, no. 5, pp. 55–66.
5. Korotkov B.I., Dizengof E.G. Ispol'zovanie i poteri pitatel'nykh veshchestv pochvy i udobreniy na melioriruemykh senokosakh i pastbishchakh [Use and loss of soil nutrients and fertilizers in reclaimed hayfields and pastures]. Moscow, 1985, 56 p.
6. Semenov N.A., Yashchenko N.A. Lizimetricheskie issledovaniya lugovykh agrofitotsenozov i pochv [Lysimetric studies of meadow agrophytocenoses and soils]. *Lizimetricheskie issledovaniya pochv : sb. tr. I Vserossiyskoy konferentsii* [Lysimetric studies of soils : collection of reports I All-Russian Conference]. Moscow, 1998, pp. 78–80.
7. Semenov N.A., Muromtsev N.A., Sabitov G.A., Korotkov B.I. Lizimetricheskie issledovaniya v lugovodstve [Lysimetric studies in meadow farming]. Yaroslavl, AversPress Publ., 2005, 498 p.
8. Korotkov B.I., Veselovski P. Rezul'taty issledovaniy po primeneniyu bespodstilochnogo navoza na meliorirovannykh senokosakh i pastbishchakh [The results of research on the use of liquid manure on reclaimed hayfields and pastures]. *Sb. nauch. trudov VIK, vyp. 39* [Collection of scientific works of the VIK, issue 39]. Moscow, 1988, pp. 144–157.
9. Semenov N.A. Lizimetricheskaya stantsiya na Lugovoy [Lysimetric station on Lugovaya]. *Lizimetricheskie issledovaniya v Rossii : sb. nauch. statey* [Lysimetric research in Russia : collection of scientific papers]. Moscow, 2004, pp. 78–85.
10. Korotkov B.I. Metodika i rezul'taty lizimetricheskikh issledovaniy v kormoproizvodstve [Methods and results of lysimetric studies in feed production]. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* [Bulletin of Agricultural Science], 1980, no. 4, pp. 130–135.
11. Korotkov B.I., Ermakova E.G. Vliyanie priemov intensivifikatsii lugovogo kormoproizvodstva na poteri pitatel'nykh veshchestv iz pochvy [The effect of methods of intensification of meadow forage production on the loss of nutrients from the soil]. *Priemy sozdaniya i ispol'zovaniya vysokoproduktivnykh senokosov i pastbishch : sb. nauch. trudov VIK, vyp. 34* [Techniques for creating and using

- highly productive hayfields and pastures : collection of scientific works of the VIK, issue 34*]. Moscow, 1986, pp. 127–135.
12. Korotkov B.I. Novye priemy ratsional'nogo primeneniya polivnoy vody i azotnykh udobreniy na kul'turnykh pastbishchakh Nechernozem'ya [New methods of rational use of irrigation water and nitrogen fertilizers on cultivated pastures of the Non-Chernozem region]. *Intensifikatsiya lugopastbishchnogo khozyaystva : sb. nauch. trudov VIK, vyp. 30* [Intensification of grassland farming : collection of scientific works of the VIK, issue 30]. Moscow, 1984, pp. 83–94.
 13. Certificate of authorship № 912118 (USSR). Sposob opredeleniya srokov i norm poliva [A method for determining the timing and norms of irrigation]. B.I. Korotkov, V.G. Iglovikov, V.G. Dikarev, M.A. Smurygin, E.A. Solopov. Announced 08/08/1980, publ. 03/15/1982, bulletin no. 3, 4 p.
 14. Korotkov B.I. Lizimetricheskie ustanovki na oroshaemykh zemlyah : inf. listok [Lysimetric installations on irrigated lands : information booklet]. Moscow, 1981, 4 p.
 15. Grechishnikov N.N. Ekologicheski bezopasnoe effektivnoe ispol'zovanie raznovozrastnykh zlakovykh pastbishch na melioriruemykh pochvakh Nechernozemnoy zony [Ecologically safe and effective use of grasslands of different ages on reclaimed soils of the Non-Chernozem zone]. *Aktual'nye problemy pochvovedeniya, ekologii i zemledeliya : sbornik dokladov XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Kurskogo otdeleniya MOO «Obshchestvo pochvovedov imeni V.V. Dokuchaeva» (Kursk, 26–28 aprelya 2023 g.)* [Topical problems of soil science, ecology and agriculture : collection of reports of the XVIII International scientific and practical conference of the Kursk branch of the IPO "Society of Soil Scientists named after V.V. Dokuchaev" (Kursk, April 26–28, 2023)]. Kursk, 2023, pp. 57–59.