



Галина Пироговская,
главный научный
сотрудник Института
почвоведения и
агрохимии НАН
Беларуси, доктор
сельскохозяйственных
наук, профессор;
brissa_pir@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты многолетних лизиметрических исследований (за 1981–2020 гг.) по поступлению атмосферных осадков на поверхность наиболее распространенных почв Республики Беларусь, их миграции и трансформации в почвенных растворах, потерям элементов питания (азота общего, нитратного и аммонийного, фосфора (P_2O_5) и калия – K_2O) из слоя почв 1,0–1,5 м в окружающую среду при применении в севооборотах при возделывании сельскохозяйственных культур стандартных и новых форм удобрений в оптимальных и повышенных дозах, а также стандартных удобрений под монокультурой многолетних бобово-злаковых травосмесей, с оценкой их экономического ущерба в системе «атмосферные осадки – почва – удобрение – растение».

Ключевые слова: лизиметрические исследования, атмосферные осадки, инфильтрация, почвенные растворы, потери при вымывании, стоимость потерь элементов питания.

Для цитирования: Пироговская Г. Вымывание питательных элементов из почв: экономический аспект // Наука и инновации. 2024. №3. С. 73–80. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-3-73-80>

УДК 631.81

ВЫМЫВАНИЕ ПИТАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПОЧВ: ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ



В условиях современного сельскохозяйственного производства ключевую роль играет плодородие возделываемых почв, уровень которого необходимо учитывать при планировании агротехнических мероприятий. Потери питательных соединений при вымывании осадками в окружающую среду – важная характеристика, являющаяся одной из приходных статей расчета хозяйственного баланса. Закономерно, что вопросами такого рода убытков занимались многие исследователи [1-11].

Наиболее подвижным элементом в почвенных экосистемах выступает азот. Нитраты, образующиеся в процессе нитрификации, хорошо растворимы в воде и могут легко продвигаться с гравитационными водами вглубь по профилю почвы, о чем свидетельствуют их повышенные концентрации в питьевой воде, пищевых продуктах, почвенных растворах [8]. Большое практическое значение для национальной экономики и экологии имеет определение количественных параметров поступления элементов питания растений с атмосферными осадками (по сути, еще одной приходной балансовой статьи). Изучение

влияния агротехнических приемов, применяемых в севооборотах, на интенсивность миграции полезных веществ из пахотного и корнеобитаемого слоя в нижележащие горизонты позволяет разработать и выявить перспективные методы снижения отрицательных последствий вымывания.

Оценка наносимого этим явлением экономического ущерба проводилась на основании данных о потерях азота, фосфора и калия при инфильтрации атмосферных осадков из наиболее распространенных почв Беларуси на пахотных землях при разных уровнях применения минеральных удобрений под посевы, а также в кормовых севооборотах под монокультурой многолетних бобово-злаковых травосмесей. Целью исследований было выявить степень потерь ценных для растений элементов на глубинах 1,0–1,5 м на разных почвах при возделывании сельскохозяйственных культур в пахотных и луговых севооборотах, а также рассчитать ущерб от снижения плодородия в денежном выражении.

Экспериментальные данные, анализируемые в данной статье, получены в период с 1981 по 2020 г. на лизиметрической станции Института почвоведения и агрохимии, расположенной в южной части г. Минска (53051'03'' N, 27030'26'' E). Станция, введенная в эксплуатацию и функционирующая с 1980 г., включает 48 насыпных лизиметров цилиндрической формы из сборных железобетонных колец. Глубина почвенного профиля в половине из них (24 лизиметрах) – 1,0 м, еще в 24 – 1,5 м. Колодцы лизиметров имеют внутренний диаметр 2,0 м и площадь 3,14 м².

Объектами исследований выступали наиболее распространенные почвы Республики Беларусь: автоморфные – дерново-подзолистые разного гранулометрического состава; полугидроморфные – дерновые заболоченные (дерново-глеевые); гидроморфные – торфянисто-глеевые низинные и торфяно-болотные низинные.

Изыскания и наблюдения проводились в трех лизиметрических опытах: 1-й – на автоморфных дерново-подзолистых почвах (лиз. 1–16, 33, 34) и торфяной низинной (лиз. 23, 24), в севооборотах со стандартными формами удобрений; 2-й – на дерново-подзолистой легкосуглинистой (лиз. 25–32), связносупесчаной (лиз. 35–40) и рыхлосупесчаной (лиз. 41–48) почвах, в севооборотах с разными дозами минеральных удобрений, в том числе и новыми их формами; 3-й – на дерново-глеевых (лиз. 17, 18), торфянисто-глеевых (лиз. 19, 20) и торфяных (лиз. 21, 22) почвах под монокультурой многолетних бобово-злаковых травосмесей (с 1981 г.).

Одновременно на лизиметрической станции в 1981 г. были установлены осадкомеры Третьякова (2 шт.) для регулярного учета количества и состава выпадающих атмосферных осадков и определения поступления с ними различных химических элементов.

Отбор лизиметрических почвенных растворов осуществлялся ежегодно трижды: весной – до внесения удобрений и посадки сельскохозяйственных культур, осенью – после их уборки, а также в начале зимы, после промерзания почвы и прекращения просачивания сквозь нее влаги. Анализ атмосферных осадков и лизиметрических вод выполняли согласно методикам, изложенным в руководствах Е.В. Аринушкиной, Ю.В. Новикова, К.О. Ласточкиной и др. [12]. В инфильтратах лизиметрических вод и осадков определяли следующие показатели: N-NO₃, N-NH₄, Нобщ, P₂O₅, K₂O.

- N-NO₃ – потенциометрический, ГОСТ 18826-73;
- N-NH₄ – ГОСТ 26488-85;
- фосфор – спектрометрический метод, СТБИСО6878-2005;
- калий – на пламенном фотометре, ГОСТ 26427-85.

Почвенные образцы в лизиметрических опытах отбирали с пахотного и подпахотных горизонтов перед закладкой (в начале севооборотов) и после уборки сельскохозяйственных культур (в конце севооборотов).

Гидротермический коэффициент (ГТК) определялся по формуле Г.Т. Селянинова: $ГТК = \Sigma X / \Sigma T / 10$, где ΣX – сумма осадков за вегетационный период, ΣT – сумма положительных температур воздуха за тот же период. Результаты исследований обрабатывали статистически с использованием дисперсионного, корреляционно-регрессионного анализа.

В данной статье приводятся среднееголетние данные за 40 лет (1981–2020 гг.) по поступлению атмосферных осадков на поверхность почв и их инфильтрации, потерям основных элементов питания растений (азота, фосфора и калия) при вымывании по 3 лизиметрическим опытам. Оценка этих потерь в денежном выражении приводится в ценах на удобрения на 01.08.2023 г. (карбамид – стоимость 1 т физического веса (ф.в.) равна 670,3 руб.; аммонизированного суперфосфата (марка 8:30) – 1835,0 руб./т ф.в.; хлористого калия гранулированного – 150,6 руб./т ф.в.), которые применяли в лизиметрических опытах.

Для оценки изменения погодных условий за последние 30 лет приводим сравнительные данные по количеству выпавших атмосферных осадков. Они показаны в целом за год, за вегетационный период возделывания сельскохозяйственных культур.

Годы	Количество атмосферных осадков		ГТК	Количество лет разной степени увлажнения
	на лизиметрической станции			
	за год	за 5–9-й месяцы	за 5–9-й	
1991	508,5	265,5	1,13	Влажных – 2 Оптимальных – 1 Слабозасушливых – 3 Засушливых – 3 Очень засушливых – 1
1992	490,9	194,3	0,78	
1993	644,8	374,1	1,74	
1994	629,9	273,5	1,15	
1995	462,8	211,4	0,87	
1996	588,2	304,5	1,32	
1997	577,6	281,8	1,21	
1998	767,5	454,5	1,98	
1999	471,4	160,6	0,62	
2000	508,4	222,7	0,98	
Среднее	565,0	274,3	1,18	
2001	633,4	387,6	1,57	Влажных – 3 Оптимальных – 4 Слабозасушливых – 2 Засушливых – 0 Очень засушливых – 1
2002	475,5	180,5	0,68	
2003	574,3	263,5	1,06	
2004	713,5	338,1	1,47	
2005	650,4	355,3	1,50	
2006	618,1	446,4	1,79	
2007	548,5	278,8	1,07	
2008	819,1	398,3	1,68	
2009	828,1	446,5	1,84	
2010	670,1	405,0	1,49	
Среднее	653,1	350,0	1,42	
2011	513,4	326,7	1,27	Влажных – 1 Оптимальных – 2 Слабозасушливых – 6 Засушливых – 1 Очень засушливых – 0
2012	684,7	275,3	1,08	
2013	563,8	271,5	1,05	
2014	615,3	463,8	1,88	
2015	449,2	202,6	0,82	
2016	567,2	222,7	1,33	
2017	733,5	345,1	1,31	
2018	523,4	311,8	1,15	
2019	492,9	261,6	1,06	
2020	488,0	279,9	1,10	
Среднее	563,1	296,1	1,21	
Среднее за 30 лет	593,7	306,8	1,27	Влажных – 6 Оптимальных – 7 Слабозасушливых – 11 Засушливых – 4 Очень засушливых – 2

Таблица 1. Количество выпавших атмосферных осадков и гидротермический коэффициент за 5–9-й месяцы на лизиметрической станции Института почвоведения и агрохимии за 1991–2020 гг.

тур (5–9-й месяцы), а также в виде величины гидротермического коэффициента (ГТК) за месяцы вегетации. Полученные сведения сравнивали со среднелетними соответствующими показателями за 2 периода наблюдений: 1961–1991 и 1991–2020 гг. (табл. 1).

Изменения климатических условий, в частности режима выпадения осадков, можно увидеть, сравнив эти данные с аналогичными показателями предыдущих 30 лет:

- за период 1991–2020 гг. среднелетнее ежегодное количество выпавших атмосферных осадков по Беларуси составило 593,7 мм, с 5-го по 9-й месяцы – 306,8 мм, средняя температура воздуха – 7,2 °С; сумма положительных температур – 2450,3 °С, гидротермический коэффициент за время вегетации – 1,27;
- в 1961–1990 гг. те же показатели – соответственно 696,0 мм, 374,0, 5,8 °С; 2269,3 °С, 1,7.

Для каждого десятилетия, а также в целом за каждый 30-летний период установлено наличие и подсчитано количество влажных, оптимальных, слабозасушливых, засушливых и очень засушливых лет. Для оценки условий увлажнения вегетационных периодов возделывания сельскохозяйственных культур применялся ГТК. Его градация следующая. Если ГТК больше 1,6, то год считается влажным, в пределах 1,6–1,3 – оптимальным, от 1,3 до 1,0 – слабозасушливым, уровень в 1,0–0,7 говорит о засушливом характере года, а 0,7–0,4 – очень засушливом, в пределах 0,4–0,2 – сухом, а при 0,2 и менее гидротермический фон можно охарактеризовать как очень сухой [19]. С 1991 по 2020 г. на лизиметрической станции наблюдалось 6 влажных лет (20,0%), оптимальных по увлажнению – 7 (23,3%), еще 11 лет были слабозасушливыми (36,7%), 4 – засушливыми (13,3%) и 2 – очень засушливыми (6,7%).

Что касается исследуемого периода (1981–2020 гг.), то погодные условия фиксировались следующие: количе-

Таблица 2. Поступление элементов питания на поверхность почв с атмосферными осадками (среднее за 1981–2020 гг.)

Среднегодовое поступление элементов с атмосферными осадками, кг/га	Поступление элементов питания с атмосферными осадками, кг/га					
	N-NO ₃	N-NH ₄	N общ.	N-NO ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅
	12,38	14,09	26,47	2,1*	9,95	1,13

* Средние данные за 2016–2020 гг.

Почва	Инфильтрация, л/м ²	Потери при вымывании, кг/га					
		1981–2020 гг.			N-NO ₃ , % от N общ.	P ₂ O ₅	K ₂ O
		N-NO ₃	N-NH ₄	N общ.			
Дерново-палево-подзолистая суглинистая, на мощном лессовидном легком суглинке, лиз. 1, 2	94,1	14,5	0,43	14,9	97,1	0,12	6,6
Дерново-палево-подзолистая суглинистая, развивающаяся на мощном лессовидном легком суглинке (агрозем), лиз. 33, 34	95,9	21,2	0,38	21,6	98,2	1,04	12,5
Почвообразующая порода (лессовидный суглинок с глубины 1,5–3,0 м), лиз. 11, 12	118,0	13,4	0,44	13,8	96,8	0,15	11,3
Дерново-подзолистая суглинистая, развивающаяся на лессовидном легком суглинке, подстилаемом с глубины 0,75 м моренным суглинком, лиз. 3, 4	146,0	30,2	0,58	30,8	98,1	0,12	7,9
Дерново-подзолистая суглинистая, развивающаяся на лессовидном легком суглинке, подстилаемом с 0,5 м рыхлым песком, лиз. 5, 6	125,6	26,0	0,62	26,6	97,7	0,09	9,0
Дерново-подзолистая супесчаная, развивающаяся на водно-ледниковой связной супеси, подстилаемой с глубины 0,7 м моренным суглинком с прослойкой песка на контакте, лиз. 7, 8	153,3	38,6	0,67	39,3	98,3	0,225	11,6
Дерново-подзолистая супесчаная, развивающаяся на водно-ледниковой рыхлой супеси, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлым песком, лиз. 9, 10	148,0	31,3	0,57	31,9	98,2	0,08	34,8
Дерново-подзолистая песчаная, развивающаяся на водно-ледниковом связном песке, сменяемом с глубины 0,25 м рыхлым песком, лиз. 13–16	209,1	42,9	1,10	44,0	97,5	0,14	48,3
Торфяная низинная, среднемошная, развивающаяся на древесно-осоковом торфе, лиз. 23, 24	97,2	43,6	0,97	44,6	97,8	0,19	11,2
НСР_{0,5}	10,2	2,01	0,033	2,14	1,97	0,017	1,27

Таблица 3. Потери элементов питания из пахотных почв Республики Беларусь (из слоя почвы 1,0–1,5 м), кг/га, средние значения за 1981–2020 гг. (опыт №1)

ство влажных лет составило 9 (22,5%), 10 были оптимальными (25,0%), слабозасушливых наблюдалось 14 (35,0%), засушливых – 5 (12,5%), очень засушливых – 2 (5,0%). Выпадение на поверхность почв атмосферных осадков (дождя, снега или града) способствует пополнению плодородного слоя различными соединениями, содержащимися в них. Сколько питатель-

ных элементов попало в почвы вместе с атмосферными осадками за годы проведения опытов, приведено в табл. 2. Установлено, что ежегодно с 1981 по 2020 гг. из атмосферы на поверхность почв в среднем выпало таким образом 12,38 кг/га азота нитратного (N-NO₃), 14,09 кг/га – аммонийного (N-NH₄), общего азота – 26,47 кг/га, калия (K₂O) – 9,95 кг/га, фосфора

(P₂O₅) – 1,13 кг/га. (Что касается N-NO₂, то его количество приведено по средним данным за менее продолжительный период наблюдений – 2016–2020 гг.).

Инфильтрация осадков из слоя глубиной 1,0–1,5 м, потери при вымывании основных элементов питания (азота, фосфора и калия) из наиболее распространенных почв республики (по лизиметрическому опыту №1), где под культуры севооборотов применяли одинаковые уровни органических и минеральных стандартных удобрений (среднегодовая доза внесения на дерново-подзолистых почвах составила 13,2 т/га органических удобрений + N_{77,6}P_{66,5}K_{135,5} и на торфяной в севообороте – N_{36,5}P₆₇K₁₃₈), представлены в табл. 3.

За 40 лет наблюдений среднегодовой объем инфильтрации различался в основном в зависимости от типа и гранулометрического состава почв: минимальный наблюдался в дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах (94,1 л/м²), максимальный – в песчаных (209,1 л/м²). Установлена такая же зависимость и в отношении потерь азота. Минимальные среднегодовые убытки общего азота в 1981–2020 гг. были из почвообразующей породы (13,8 кг/га, в том числе нитратного азота – 13,4 кг/га, аммонийного – 0,44 кг/га); далее следуют показате-

тели по дерново-подзолистой легкосуглинистой, развивающейся на мощных лессовидных суглинках почве – 14,9 кг/га (нитратного азота – 14,5, аммонийного – 0,43 кг/га). На той же дерново-подзолистой легкосуглинистой, но высококультуренной почве (агроземе) потери общего азота были больше – 21,6 кг/га (нитратного – 21,2 и аммонийного – 0,38 кг/га). Убытие общего азота из дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, подстилаемой с глубины 0,75 м моренным суглинком или песком с 0,5 м, находилось в пределах от 26,6 до 30,8 кг/га; соответственно, из дерново-подзолистых связно-, рыхлосупесчаных почв – 31,9–39,3 кг/га; из дерново-подзолистой песчаной – 44,0, торфяной в севообороте – 44,6 кг/га. При этом следует отметить, что на долю нитратного азота приходилось от 96,8% (почвообразующая порода) до 98,2% (дерново-подзолистая легкосуглинистая, агрозем) – 98,3% (дерново-подзолистая связносупесчаная) (табл. 3).

Потери фосфора при вымывании наблюдались незначительные и на исследуемых почвах составляли от 0,09 кг/га (дерново-подзолистая легкосуглинистая, подстилаемая с 0,5 м рыхлым песком) до 1,04 кг/га (дерново-подзолистая легкосуглинистая, агрозем). Максимальные потери калия

Почва	Стоимость потерь при вымывании элементов питания, руб./га и долл./га					
	Азотные		Фосфорные		Калийные	
	Руб./га	Долл./га	Руб./га	Долл./га	Руб./га	Долл./га
Дерново-палево-подзолистая суглинистая, развивающаяся на мощном лессовидном легком суглинке, лиз. 1, 2	21,8	7,2	0,734	0,24	1,66	0,55
Дерново-палево-подзолистая суглинистая, развивающаяся на мощном лессовидном легком суглинке (агрозем), лиз. 33, 34	31,4	10,4	6,361	2,10	3,14	1,03
Почвообразующая порода (лессовидный суглинок с глубины 1,5–3,0 м), лиз. 11, 12	20,2	6,6	0,918	0,30	2,84	0,93
Дерново-подзолистая суглинистая, развивающаяся на лессовидном легком суглинке, подстилаемом с глубины 0,75 м моренным суглинком, лиз. 3, 4		14,8	0,734	0,24	1,98	0,65
Дерново-подзолистая суглинистая, развивающаяся на лессовидном легком суглинке, подстилаемом с 0,5 м рыхлым песком, лиз. 5, 6	38,8	12,8	0,551	0,18	2,26	0,74
Дерново-подзолистая супесчаная, развивающаяся на водно-ледниковой связной супеси, подстилаемой с глубины 0,7 м моренным суглинком с прослойкой песка на контакте, лиз. 7, 8	57,2	18,9	1,376	0,45	2,91	0,96
Дерново-подзолистая супесчаная, развивающаяся на водно-ледниковой рыхлой супеси, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлым песком, лиз. 9, 10	46,4	15,3	0,489	0,16	8,73	2,88
Дерново-подзолистая песчаная, развивающаяся на водно-ледниковом связном песке, сменяемом с глубины 0,25 м рыхлым песком, лиз. 13–16	64,1	21,1	0,856	0,28	12,12	4,00
Торфяная низинная, среднемошная, развивающаяся на древесно-осоковом торфе, лиз. 23, 24	64,9	21,4	1,162	0,38	2,81	0,93

Таблица 4. Потери элементов питания при вымывании из пахотных почв Республики Беларусь в денежном выражении, руб./га и долл./га (по средним данным за 1981–2020 гг., лизиметрический опыт №1)

Таблица 5. Влияние системы удобрения на изменение инфильтрации атмосферных осадков (слой 1,0–1,5 м) и потери элементов питания в пахотных дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава, 1991–2020 гг. (лизиметрический опыт №2)

Почва	Инфильтрация, л/м ² (за 1981–2020 гг.)	Потери при вымывании, кг/га					
		1981–2020 гг.			N-NO ₃ , % от N общ.	P ₂ O ₅	K ₂ O
		N-NO ₃	N-NH ₄	N общ.			
Дерново-подзолистая суглинистая, развивающаяся на мощном лессовидном легком суглинке							
N ₉₀ P ₄₉ K ₁₁₈	73,2	13,2	0,91	14,1	93,6	0,102	16,1
N ₁₁₀ P ₆₀ K ₁₄₄	81,1	18,6	1,11	19,7	94,4	0,122	19,3
HCP _{0,5}	5,8	1,21	0,149	–	–	0,007	1,43
Дерново-подзолистая супесчаная, развивающаяся на водно-ледниковой рыхлой супеси, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлым песком, легком суглинке							
N ₉₀ P ₄₉ K ₁₁₈	121,8	26,0	2,66	28,7	90,6	0,084	27,5
N ₁₁₀ P ₆₀ K ₁₄₄	125,4	30,2	3,53	33,7	89,6	0,186	30,1
HCP _{0,5}	8,8	1,93	0,215	–	–	0,009	2,33

Таблица 6. Стоимость потерь элементов питания при разных уровнях применения минеральных удобрений на дерново-подзолистой легкосуглинистой и рыхлосупесчаной почвах (по средним данным за 1991–2020 гг.)

Почва		Стоимость потерь при вымывании элементов питания, руб./га и долл./га					
		Азотные		Фосфорные		Калийные	
		Руб./га	Долл./га	Руб./га	Долл./га	Руб./га	Долл./га
Дерново-подзолистая суглинистая, развивающаяся на мощном лессовидном легком суглинке	N ₉₀ P ₄₉ K ₁₁₈	20,6	6,8	0,624	0,21	4,0	1,3
	N ₁₁₀ P ₆₀ K ₁₄₄	28,7	9,5	0,746	0,25	4,8	1,6
Дерново-подзолистая супесчаная, развивающаяся на водно-ледниковой рыхлой супеси, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлым песком легком суглинке	N ₉₀ P ₄₉ K ₁₁₈	41,8	13,8	0,514	0,17	6,9	2,3
	N ₁₁₀ P ₆₀ K ₁₄₄	49,2	16,2	1,138	0,38	7,6	2,5

при вымывании – на дерново-подзолистых песчаных (48,3 кг/га) и дерново-подзолистых рыхлосупесчаных, подстилаемых рыхлыми песками (34,8 кг/га) грунтах. Эти данные свидетельствуют, что на почвах легкого гранулометрического состава не рекомендуется внесение калийных удобрений с осени, так как их потери при вымывании значительны.

В денежном выражении убытки на 1 га (в ценах на 01.08.2023 г. при курсе доллара 3,0344 бел. руб.) составили:

- **азота** при применении азотных удобрений в форме карбамида – от 21,8 руб./га (7,2 долл.) на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве до 64,1 (песчаная) и 64,9 (торфяная) руб./га (21,1 и 21,4 долл. соответственно);
- **фосфора** при внесении аммонизированного суперфосфата – от 0,489 до 6,361 руб./га, или от 0,16 до 2,1 долл./га;
- **калия** – от 1,66 до 12,12 руб./га, или от 0,55 (легкосуглинистая) до 4,0 (песчаная) долл./га (табл. 4).

Известно, что потери элементов питания значительно различаются в зависимости от уровней применения минеральных удобрений [16]. Приводим данные (в табл. 5), полученные в результате лизиметрического опыта №2 в период с 1991 по 2020 г. на дерново-подзолистой легкосуглинистой и рыхлосупесчаной почвах при оптимальном и повышенном уровнях использования удобрений, подтверждающие вышеуказанную закономерность.

Установлено, что на инфильтрацию атмосферных осадков системы удобрения оказывали меньшее влияние, чем гранулометрический состав почв. В 1991–2020 гг. среднегодовая инфильтрация атмосферных осадков из слоя 1,0–1,5 м в дерново-подзолистых легкосуглинистых почв в вариантах с разными дозами (оптимальными – N₉₀P₄₉K₁₁₈ (сумма 257 кг/га д.в.) и повышенными – N₁₁₀P₆₀K₁₄₄ (сумма 314 кг/га д.в.) составила 73,2 и 81,1 л/м² соответственно; на дерново-подзолистых рыхлосупесчаных, подстилаемых рыхлыми песками почвах – 121,8 и 125,4 л/м² (табл. 5).

При вымывании из дерново-подзолистой легко-суглинистой почвы (слой 1,0–1,5 м) при оптимальном уровне применения минеральных удобрений потери N-NO₃ составляли 13,2 кг/га, N-NH₄ – 0,91 кг/га, азота общего (N общ.) – 14,1 кг/га, фосфора (P₂O₅) – 0,102 кг/га, калия (K₂O) – 16,1 кг/га; из дерново-подзолистой рыхлосупесчаной – 26,0 и 2,66 кг/га, 28,7, 0,084, 27,5 кг/га соответственно. При повышенной дозировке минеральных удобрений увеличился как объем инфильтрации с атмосферными осадками, так и потери при вымывании элементов на обеих почвах, в том числе общего азота – в 1,17–1,40 раза, калия – в 1,1–1,2. Вымывание фосфора также повысилось, но его количество столь мало, что делать выводы считаем нецелесообразным (табл. 5).

Убытки при вымывании основных элементов в денежном выражении на 1 га (в ценах на 01.08.2023 г. и курсе доллара, равном 3,0344 бел. руб.) составили: при применении минеральных удобрений в оптимальных дозах (N₉₀P₄₉K₁₁₈), в том числе азотных удобрений в форме карбамида на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, – от 20,6 руб./га (6,8 долл.), на дерново-подзолистой рыхлосупесчаной почве – 41,8 руб./га (13,8 долл.). При дозе N₁₁₀P₆₀K₁₄₄ 4 эти показатели, соответственно, 28,7 руб./га (9,5 долл./га) и 49,2 руб./га (16,2 долл./га).

Потери фосфора в денежном выражении на исследуемых почвах были незначительными и составляли при первой дозе от 0,514 до 0,624, при второй – от 0,746 до 1,138 руб./га, или от 0,17 до 0,38 долл./га. Стоимость вымытого водами калия находилась в пределах 4,0–7,6 руб./га, или от 1,3 до 2,5 долл./га, в зависимости от доз применяемых калийных удобрений и почв (табл. 6).

В табл. 7 приведены данные по потерям, полученным в лизиметрическом опыте №3, и их стоимости. Опыт проводился на полугидроморфных почвах

при возделывании многолетних бобово-злаковых травосмесей с 1981 по 2016 г. (в 2017 г. производился ремонт лизиметров на этих почвах).

Данные табл. 7 показывают, что и на этих типах почв инфильтрация атмосферных осадков, потери элементов питания и, соответственно, стоимость этих потерь в денежном выражении различалась в зависимости от типа и гранулометрического состава почв.

Сравнительный анализ полученных данных приводит к следующим выводам.

- *Среднегодовое количество* (за 1981–2020 гг.) элементов питания, поступающих с атмосферными осадками на поверхность почв, составляло: N-NO₃ – 12,38 кг/га, N-NH₄ – 14,09 и общего азота – 26,47 кг/га, калия (K₂O) – 9,95 кг/га, фосфора (P₂O₅) – 1,13 кг/га.
- *Общий объем инфильтрации атмосферных осадков и потери азота* при вымывании изменялись в зависимости от типа и гранулометрического состава почв: минимальные среднегодовые потери общего азота в среднем за 1981–2020 гг. были из почвообразующей породы (13,8 кг/га, в том числе нитратного азота – 13,4 кг/га, аммонийного – 0,44 кг/га); из дерново-подзолистой легкосуглинистой, развивающейся на мощных лессовидных суглинках почве – 14,9 кг/га (14,5 и 0,43 кг/га). На агроземе – дерново-подзолистой легкосуглинистой, но высококультуренной почве – потери общего азота увеличивались и составили 21,6 кг/га (21,5 и 0,38 кг/га); на дерново-подзолистых легкосуглинистых, подстилаемых с глубины 0,75 м моренным суглинком, а также песком с 0,5 м, они находились в пределах от 26,6 до 30,8 кг/га; соответственно, дерново-подзолистой связно-, рыхлосупесчаной вымывалось 31,9–39,3 кг/га; из дерново-подзолистой песчаной – 44,0, торфяной в севообороте – 44,6 кг/га.

Почва	Инфильтрация, л/м ² (1981-2020 гг.)	Потери при вымывании, кг/га			Стоимость потерь при вымывании элементов питания, долл.		
		N общ.	P ₂ O ₅	K ₂ O	N общ.	P ₂ O ₅	K ₂ O
Дерново-глеевая, лиз. 17, 18	117,2	9,5	0,117	8,1	4,6	0,24	0,67
Торфянисто-глеевая, лиз. 19, 20	101,6	29,0	0,103	7,7	13,9	0,21	0,64
Торфяная низинная, лиз. 21, 22	90,4	39,4	0,154	6,7	18,9	0,31	0,55
НСР0,5	3,76	1,85	0,0071	0,55			

Таблица 7. Изменение инфильтрации атмосферных осадков и потери при вымывании азота, фосфора и калия в дерново-глеевых, торфянисто-глеевых и торфяных низинных почвах Беларуси при возделывании бобово-злаковых травосмесей (1981–2020 гг.)

- *Вымывание фосфора* наблюдалось незначительное: на исследуемых почвах оно составляло от 0,09 кг/га (дерново-подзолистая легкосуглинистая, подстилаемая с 0,5 м рыхлым песком) до 1,04 кг/га (дерново-подзолистая легкосуглинистая, агрозем).
- *Калий максимально терялся* с осадками из дерново-подзолистых песчаных (48,3 кг/га) и дерново-подзолистых рыхлосупесчаных, подстилаемых рыхлыми песками (34,8 кг/га) почв; для легкосуглинистых и связносупесчаных соответствующие показатели фиксировались на уровне от 6,6 до 11,6 кг/га.
- *Ущерб от потери элементов питания растений* на 1 га в денежном выражении (в ценах на 01.08.2023 г. и при курсе доллара, равном 3,0344 бел. руб.) составлял: при применении азотных удобрений в форме карбамида – от 21,8 руб./га (7,2 долл.) на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве до 64,1 и 64,9 руб./га (21,1 и 21,4 долл.) на песчаной и торфяной соответственно; потери фосфора на исследуемых почвах – от 0,489 до 6,361 руб./га, или от 0,16 до 2,1 долл./га; калия – от 1,66 до 12,12 руб./га, или от 0,55 (легкосуглинистая) до 4,0 (песчаная) долл./га.
- *Применение повышенных доз минеральных удобрений* при выращивании сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистых легкосуглинистых и рыхлосупесчаных почвах увеличивает потери общего азота в 1,17–1,40 раза (на 2,4–2,7 долл./га), калия – в 1,1–1,2 раза (на 0,2–0,3 долл./га).
- *При возделывании многолетних бобово-злаковых травосмесей* в монокультуре инфильтрация элементов питания зависит от типа почв: самое большое вымывание азота (29,0 и 39,4 кг/га, или 13,9 и 18,9 долл./га) отмечается на торфянисто-глеевых и торфяных низинных почвах, а калия (K₂O) – на дерново-глеевых (8,1 кг/га, или 0,67 долл./га).

Таким образом, исследование колебаний уровня питательных компонентов сельскохозяйственных угодий страны даст возможность рассчитать дозировку применяемых удобрений для различных видов не только культивируемых культур, но и типов почв, на которых планируется их выращивание. Кроме того, знание о потерях главных элементов питания растений при вымывании из автоморфных дерново-подзолистых, полугидроморфных и гидроморфных почв полезно для определения затрат, необходимых для поддержания плодородия, и минимизации расходов при сохранении либо повышении урожайности в хозяйствах, что, безусловно, положительно скажется на продовольственной безопасности нашей страны. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Безлюдный Н.Н. Потери азота из дерново-подзолистых почв БССР при инфильтрации атмосферных осадков // Экологические последствия применения агрохимикатов (удобрения): тез. докл. Всесоюз. рабочего совещ. по междунар. программе ЮНЕСКО «Человек и биосфера» Проект 9-а «Экологическая оценка последствий использования удобрений в наземных и пресноводных экосистемах». – Пушкино, 1982. С. 74–75.
2. Бобрицкая М.А. Вынос элементов питания растений из почвы при инфильтрации осадков в зоне достаточного увлажнения / М.А. Бобрицкая, Н.Н. Москаленко // Агрохимия. 1966. №10. С. 126–150.
3. Борисова Л.М. Влияние длительного применения разных систем удобрений в овощном севообороте на накопление, миграцию и потери азота в аллювиальной луговой почве / Л.М. Борисова, В.А. Борисов // Агрохимия. 1986. №3. С. 3–7.
4. Кирушин В.И. О нисходящей миграции нитратов в черноземах Сибири при сельскохозяйственном использовании / В.И. Кирушин, Г.И. Ткаченко // Почвоведение. 1986. №2. С. 34–44.
5. Миграция питательных веществ в почвах Республики Беларусь / Г.В. Пироговская [и др.] // Агрохимический вестник. 2002. №4. С. 23–25.
6. Пироговская Г.В. Изменение климатических условий и их влияние на продуктивность сельхозкультур в Беларуси // Наука и инновации. 2013. №12 (130). С. 61–65.
7. Пироговская Г.В. Инфильтрация атмосферных осадков в пахотных почвах Республики Беларусь при длительном сельскохозяйственном использовании (по данным лизиметрических исследований 1981–2012 г.) // Почвоведение и агрохимия. 2015. №1 (54). С. 179–189.
8. Пироговская Г.В. Миграция и баланс азота в дерново-подзолистых почвах при разных уровнях применения азотных удобрений (по данным лизиметрических исследований РУП «Институт почвоведения и агрохимии») / Г.В. Пироговская, О.П. Сазоненко // Почвоведение и агрохимия. 2011. №2 (47). С. 149–164.
9. Сазоненко О.П. Интенсивность миграции химических элементов в дерново-подзолистых почвах при разных формах и уровнях применения азотных удобрений в звене севооборота : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук : 06.01.04 / О.П. Сазоненко; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т почвоведения и агрохимии НАН Беларуси. – Минск, 2006.
10. Умарова А.Б. Почвенно-экологический мониторинг процессов переноса воды и веществ в модельных дерново-подзолистых почвах в условиях многолетнего лизиметрического опыта: автореф. дис. ... канд. биол. наук : 06.01.03 / А.Б. Умарова; Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. – М., 1995.
11. Пироговская Г.В. Поступление, потери элементов питания растений в системе «атмосферные осадки – почва – удобрение – растение» / Г.В. Пироговская. – Минск, 2018.
12. Новиков Ю.В. Методы исследования качества воды водоемов / Ю.В. Новиков, К.О. Ласточкина, З.Н. Болдина; под ред. А.П. Шциковой. – М., 1990.

Статья поступила в редакцию 28.08.2023 г.

■ **Summary.** The article presents the results of long-term lysimetric studies (for 1981–2020) on the influx of atmospheric precipitation onto the surface of the most common soils of the Republic of Belarus, their migration and transformation in soil solutions, the loss of nutrients (total nitrogen, nitrate and ammonium, phosphorus (P₂O₅) and potassium – K₂O) from a soil layer of 1.0–1.5 m into the environment when used in crop rotations when cultivating agricultural crops of standard and new forms of fertilizers in optimal and increased doses, as well as standard fertilizers under a monoculture of perennial legume-cereal grass mixtures, with an assessment their economic damage in the system «atmospheric precipitation – soil – fertilizer – plant».

■ **Keywords:** lysimetric studies, precipitation, infiltration, soil solutions, leaching losses, cost of battery losses.

■ <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-3-73-80>