

УДК 631.81:631.445.24: 631.416.4

Г. В. ПИРОГОВСКАЯ

**ПОСТУПЛЕНИЕ КАЛИЯ С АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ, КОНЦЕНТРАЦИЯ
В ПОЧВЕННЫХ РАСТВОРАХ И МИГРАЦИЯ ИЗ ПАХОТНЫХ ДЕРНОВО-
ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ БЕЛАРУСИ
(по данным лизиметрических исследований за 1981–2012 гг.)**

Институт почвоведения и агрохимии, Минск, Беларусь, e-mail: brissa_pir@mail.ru

В статье приведены результаты многолетних опытов, позволяющих определить миграцию и баланс элементов питания в земледелии в системе «атмосферные осадки – почва – удобрение – растение». Изучено поступление калия с атмосферными осадками на поверхность почвы, потери его при вымывании из пахотных дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава (из слоя 1,0–1,5 м) в процессе длительного сельскохозяйственного использования (1981–2012 гг.): по сезонам года и десятилетиям (1981–1990, 1991–2000 и 2001–2010 гг.) в различные по степени увлажнения годы.

Ключевые слова: атмосферные осадки, лизиметрические исследования, дерново-подзолистые почвы, концентрация калия в почвенном растворе, потери калия при вымывании.

H. V. PIRANOUSKAYA

**POTASSIUM UPTAKE WITH PRECIPITATION, CONCENTRATION IN SOIL SOLUTIONS
AND MIGRATION FROM ARABLE SOD-PODZOLIC SOILS OF BELARUS
(ON THE DATA OF LYSIMETRIC RESEARCHES IN 1981–2012)**

The Institute for Soil Science and Agrochemistry, Minsk, Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: brissa_pir@mail.ru

The article deals with the results of long term experiments determining migration and balance of nutrition elements in the system: precipitation-soil-fertilizer-plant. Studied is potassium uptake with precipitation on soil surface, its losses when it is leached from sod-podzolic soils of different granulometric composition (from soil layer 1,0–1,5 m) during long agricultural use (1981–2012): different seasons of the year and decades (1981–1990, 1991–2000 and 2001–2010), and years with different degree of soil moisturization.

Keywords: atmosphere precipitation, lysimetric researches, sod-podzolic soils, potassium concentration in a soil solution, leaching losses.

В настоящее время изучение поступления элементов питания с атмосферными осадками и определение доли их непроемчивых потерь в окружающую среду, в том числе и калия, внесенных в почву с удобрениями, является перспективным направлением исследований. Миграция потерь калия зависит от целого ряда факторов: почвенных (гранулометрического и минералогического состава почв), климатических (количества атмосферных осадков, температуры воздуха), возделываемой культуры, количества внесенных органических и минеральных удобрений и т.д. [1–3]. Катион K^+ является одним из основных катионов щелочных и щелочно-земельных металлов, представленных в атмосферных осадках, почвенных растворах. Калий относится и к сильным электролитам, которые могут находиться в почвенных растворах в избыточных количествах, и доступность его для растений может быть высокой [4]. Известно также, что калий прочно закрепляется в кристаллических решетках глинистых минералов благодаря низкой энергии гидратации и соответствию величины радиуса иона K^+ (0,133 нм) размеру гексагональных пустот тетраэдрических сеток глинистых минералов. В связи с этим на почвах разного гранулометрического состава, преимущественно на почвах легкого гранулометрического состава с низким содержанием физической глины и илистых частиц, низким содержанием

органического вещества, потери калия за пределы почвенного профиля могут меняться в широких пределах [5, 6].

При решении ряда практических и экологических проблем при возделывании сельскохозяйственных культур в интенсивных технологиях важное значение имеют многолетние лизиметрические исследования, позволяющие определить миграцию и баланс элементов питания в земледелии в системе «атмосферные осадки – почва – удобрение – растение» [3].

В настоящей статье обобщены результаты многолетних (1981–2012 гг.) исследований по поступлению калия с атмосферными осадками, инфильтрации осадков, концентрациям калия в почвенных растворах и потерям его при вымывании через слой 1,0–1,5 м из пахотных дерново-подзолистых почв Республики Беларусь, которыми заполнены лизиметры на лизиметрической станции РУП «Институт почвоведения и агрохимии» (г. Минск).

Цель исследований – изучить поступление калия с атмосферными осадками, потери его при вымывании из пахотных дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава в процессе длительного сельскохозяйственного использования (1981–2012 гг.), по сезонам года и десятилетиям (1981–1990, 1991–2000, 2001–2010 гг.), в различные по степени увлажнения годы.

Материалы и методы исследования. Изучение количественных показателей поступления калия с атмосферными осадками и его интенсивности миграции из пахотных почв Республики Беларусь начаты с 1980 г. после сооружения лизиметрической станции (г. Минск). Исследования проводили в насыпных, цилиндрической формы железобетонных лизиметрах, заложенных в двух- и четырехкратной повторности. Внутренний диаметр лизиметров – 2,0 м, площадь – 3,14 м², глубина размещения лизиметров – 1,0 и 1,5 м (по 24 лизиметра на каждой глубине).

Лизиметрические исследования проводили на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава:

1) дерново-подзолистой легкосуглинистой, развивающейся на мощном лессовидном суглинке (лиз. 1, 2);

2) дерново-подзолистой суглинистой, развивающейся на легком лессовидном суглинке (высококультуренной), (лиз. 33, 34);

3) почвообразующей породе (лессовидный суглинок с глубины 1,5–3,0 м), (лиз. 11, 12);

4) дерново-подзолистой суглинистой, развивающейся на лессовидном суглинке, подстилаемом с глубины 0,75 м моренным суглинком (лиз. 3, 4);

5) дерново-палево-подзолистой суглинистой, развивающейся на лессовидном суглинке, подстилаемом с глубины 0,5 м рыхлым песком (лиз. 5, 6);

6) дерново-подзолистой супесчаной, развивающейся на супеси связной, подстилаемой с глубины 0,45 м прослойкой песка на контакте, а с глубины 0,7 м моренным суглинком (лиз. 7, 8);

7) дерново-подзолистой супесчаной, развивающейся на супеси рыхлой, сменяемой с глубины 0,3 м связным песком, а с глубины 0,5 м рыхлым песком (лиз. 9, 10);

8) дерново-подзолистой песчаной, развивающейся на связном песке, сменяемом с глубины 0,25 м рыхлым песком (лиз. 13–16).

Для сопоставимости экспериментальных данных на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава исследования (лизиметрический опыт № 1) проводили на одном уровне минерального питания в севооборотах со следующим чередованием культур:

1-й севооборот (1981–1985 гг.): картофель (1981 г.) – ячмень (1982 г.) – однолетние травы (клевер + люпин) (1983 г.) – ячмень (1984 г.) – озимая рожь на зеленую массу (на з/м) (1985 г.);

2-й севооборот (1986–1990 гг.): кормовые корнеплоды (1986 г.) – овес + редька масличная на з/м (1987 г.) – картофель (1988 г.) – ячмень (1989 г.) – картофель (1990 г.);

3-й севооборот (1991–1995 гг.): ячмень (1991 г.) – пелюшко-овсяная смесь на з/м (1992 г.) – сахарная свекла (1993 г.) – ячмень (1994 г.) – овес (1995 г.);

4-й севооборот (1996–2000 гг.): кукуруза (1996 г.) – ячмень (1997 г.) – пелюшко-овсяная смесь (1998 г.) – озимая рожь (1999 г.) – овес (2000 г.);

5-й севооборот (2001–2005 гг.): горохо-овсяная смесь (2001 г.) – гречиха (2002 г.) – картофель (2003 г.) – просо (2004 г.) – овес + промежуточная культура – горчица белая (2005 г.);

6-й севооборот (2006–2010 гг.): люпин (2006 г.) – гречиха (2007 г.) – картофель (2008 г.) – просо (2009 г.) – овес + промежуточная культура – горчица белая (2010 г.);

7-й севооборот (2011–2015 гг.): люпин (2011 г.) – кукуруза (2012 г.) – картофель (2013 г.) – ячмень (2014 г.) – голозерный овес (2015 г.).

Среднегодовая доза (за 1980–2012 гг.) органических и минеральных удобрений на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава составила 12 т/га органических удобрений и $N_{72}P_{61}K_{103}$.

В качестве минеральных удобрений под культуры севооборотов вносили стандартные удобрения: азотные – мочевину; фосфорные – аммонизированный суперфосфат, или аммофос; калийные – гранулированный хлористый калий.

Одновременно на лизиметрической станции (г. Минск) с 1980 г. установлены осадкомеры Третьякова (2 шт.) для учета осадков и определения поступления с ними различных химических элементов. В лизиметрических опытах определяли учет инфильтрации атмосферных осадков, концентрации и ионный состав почвенных растворов и осадков, а также потери элементов питания при вымывании из почв под различными сельскохозяйственными культурами, в том числе и калия.

Методы исследований – лизиметрический, химический и аналитический.

Закладку лизиметрических опытов, уход за растениями, учет атмосферных осадков, инфильтратов лизиметрических вод, анализ осадков и почвенных растворов проводили в соответствии с общепринятыми методиками по проведению лизиметрических исследований [7–9]. Названия почв приведены согласно классификации почв в Республике Беларусь [10]. Результаты исследований обрабатывали статистически по Б. А. Доспехову с использованием соответствующих программ дисперсионного анализа на ПЭВМ [11].

Результаты и их обсуждение. Результаты наблюдений за атмосферными осадками на лизиметрической станции (г. Минск) за период 1981–2012 гг. показывают, что только в 5 годах (15,6 %) из 32 количество осадков превышало среднееголетнее значение (696 мм – среднее за 1961–1990 гг.), в том числе: в 1981 г. – 702,2 мм, 1998 г. – 767,5, 2004 г. – 713,5, 2008 г. – 819,1 и 2009 г. – 828,1 мм. Особенно неблагоприятными засушливыми условиями атмосферного увлажнения как в период вегетации растений (апрель – сентябрь), так и в целом за год с количеством осадков менее 500 мм в год были 1983, 1984, 1986, 1992, 1995, 1999, 2002 гг. Гидротермический коэффициент (ГТК) за 5–9 месяцы в годы исследований изменялся от 0,62 (1999 г.) до 1,84 (2009 г.). На долю влажных годов (ГТК выше 1,6) пришлось 25,0 % лет (8 лет из 32 лет наблюдений); оптимальных (ГТК 1,3–1,6) – 28,1 %; слабозасушливых (ГТК 1,3–1,0) – 28,1 %; засушливых (ГТК 1,0–0,7) – 12,5 % и очень засушливых (ГТК 0,7–0,4) – 6,3 % лет. Гидротермический коэффициент в среднем за 1981–1990 гг. составил 1,41, 1991–2000 гг. – 1,18 и 2001–2012 гг. – 1,42. На долю слабозасушливых, засушливых и очень засушливых лет приходилось 46,9 % года.

Концентрации K_2O и его поступление с атмосферными осадками значительно различалось по месяцам и годам исследований (табл. 1).

Среднегодовая концентрация K^+ в атмосферных осадках на лизиметрической станции (г. Минск) в среднем за 1981–2012 гг. составила 1,61 мг/л (при минимальном значении – 0,37 (2007 г.) и максимальном – 7,28 (1997 г.) мг/л), за 1981–1990 гг. – 1,61, 1991–2000 гг. – 2,38 и 2001–2010 гг. – 0,90 мг/л. Среднегодовое (за 32 года) поступление калия с атмосферными осадками составило 9,4 кг/га, с минимальным поступлением в размере 2,0 кг/га (2009 г.) и максимальным – 42,1 кг/га (1998 г.) (см. табл. 1).

По средним данным за 1981–2012 гг. в г. Минске максимумы по содержанию калия в атмосферных осадках наблюдались в осенний (1,77 мг/л) и весенний (1,74 мг/л), далее летний (1,57 мг/л) и зимний (1,36 мг/л) периоды. Наибольшие концентрации калия в осадках во все сезоны года отмечались в 1991–2000 гг. (средняя концентрация калия составила 2,38 мг/л). Что касается поступления калия с атмосферными осадками за лизиметрический год, то в среднем поступило 9,5 кг/га K_2O , за 1981–1990 гг. – 9,2, 1991–2000 гг. – 13,6 и за 2001–2010 гг. – 5,9 кг/га. При этом максимальные поступления калия во все периоды отмечались в летние месяцы (табл. 2).

Установлено, что среднегодовое количество поступления калия с атмосферными осадками было более высоким в слабозасушливые по степени увлажнения годы (12,0 кг/га), далее в близкие к среднееголетним (оптимальные) – 9,8 кг/га (табл. 3).

Т а б л и ц а 1. Поступление калия с атмосферными осадками, 1981–2002 гг.

Год	Кол-во осадков, мм/год	Содержание K_2O в атмосферных осадках, мг/л												Поступление K_2O с осадками, кг/га
		Месяцы												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1981	702,2	1,00	0,90	1,80	1,30	2,50	1,30	5,03	1,68	2,36	4,24	3,30	3,26	16,8
1982	553,9	1,17	1,06	2,18	1,35	3,38	1,55	1,00	1,97	0,71	1,45	1,75	0,50	8,3
1983	489,8	3,00	2,62	1,17	1,28	4,70	1,00	1,70	3,00	2,84	1,33	0,60	0,60	9,7
1984	453,6	0,60	0,60	0,60	10,0	1,33	0,57	1,30	0,99	0,50	1,18	2,14	1,08	7,9
1985	602,5	1,25	1,25	1,25	1,25	0,63	1,50	1,00	2,00	1,25	1,00	1,50	1,00	7,5
1986	480,8	1,20	1,19	2,10	2,38	0,80	1,10	1,30	0,40	3,50	2,85	4,50	1,15	9,0
1987	602,9	1,95	1,95	1,60	1,85	1,95	0,75	0,50	0,90	0,50	0,90	0,60	0,20	6,9
1988	630,8	0,30	0,65	1,10	1,30	1,58	0,42	2,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	6,8
1989	607,9	1,00	1,00	3,25	1,25	1,00	1,00	1,00	0,55	0,90	1,00	1,00	1,00	7,1
1990	630,0	1,76	1,88	1,06	4,23	4,43	2,10	1,14	2,96	1,38	0,95	1,14	1,05	12,6
1991	508,5	1,42	1,30	2,25	1,66	2,00	1,20	0,82	1,08	0,56	0,46	0,46	0,62	9,3
1992	490,9	1,23	0,62	0,77	0,56	2,36	3,30	3,30	0,83	1,50	0,67	1,16	1,67	5,9
1993	644,8	2,00	0,38	0,32	0,55	1,26	0,79	2,04	2,50	3,40	2,30	2,20	0,30	7,4
1994	629,9	0,30	0,45	4,22	3,00	2,56	2,40	1,25	0,20	0,04	0,37	0,62	0,49	9,7
1995	462,8	0,30	0,50	0,64	1,00	3,76	1,26	2,22	1,50	0,83	0,31	2,56	1,20	8,3
1996	588,2	0,20	0,10	1,40	1,50	3,10	3,54	8,90	8,10	9,30	9,00	8,50	9,10	6,2
1997	577,6	8,00	7,23	6,40	7,38	6,50	7,45	6,99	7,42	7,43	7,51	7,49	7,58	30,8
1998	767,5	7,32	0,53	0,22	0,40	1,03	0,49	0,28	0,14	0,49	0,08	5,25	2,58	42,1
1999	471,4	1,00	1,10	1,20	2,00	4,30	1,30	2,20	2,40	1,08	0,97	0,60	0,21	12,0
2000	508,4	1,33	0,15	0,20	0,63	3,81	3,81	0,45	0,37	0,35	1,12	2,65	1,15	7,2
2001	633,4	1,13	0,46	0,99	1,36	1,33	1,24	0,71	0,48	0,53	0,10	1,25	0,30	6,8
2002	475,5	0,40	0,35	1,40	0,68	1,85	1,94	1,50	2,10	2,05	0,28	0,16	3,75	13,4
2003	567,4	1,67	2,14	2,58	1,38	1,30	2,00	0,20	0,50	4,40	0,50	1,50	0,30	5,2
2004	713,5	0,10	0,20	0,30	0,80	0,70	0,70	0,20	0,10	0,10	0,40	0,70	0,80	6,5
2005	650,4	1,10	0,60	0,70	2,80	0,64	1,07	1,38	0,15	0,29	0,57	0,64	0,57	8,7
2006	618,1	0,82	0,44	1,53	0,62	0,35	0,46	0,17	0,08	0,38	1,43	0,79	0,82	3,0
2007	548,5	0,17	0,39	0,08	1,22	0,53	0,59	0,10	0,11	0,32	0,18	0,62	0,16	5,7
2008	819,1	0,44	0,56	0,54	0,24	0,40	0,30	1,05	0,81	0,90	0,72	1,62	1,32	4,1
2009	828,1	0,54	0,78	0,50	0,20	1,72	0,39	0,04	0,16	0,16	0,26	0,14	0,57	2,0
2010	670,1	0,97	0,89	1,03	1,53	1,00	0,88	4,27	2,85	1,42	3,00	1,00	2,50	6,1
2011	519,4	1,00	1,00	0,20	1,50	1,50	1,05	0,30	0,85	1,50	1,50	10,5	3,50	3,8
2012	684,7	1,30	0,80	0,90	0,50	0,11	0,14	0,10	0,18	0,11	1,60	1,10	0,60	11,9
Среднее	597,9	1,44	1,06	1,39	1,80	2,01	1,49	1,72	1,51	1,63	1,54	2,16	1,59	9,4

Т а б л и ц а 2. Содержание K_2O в атмосферных осадках и его поступление на поверхность почвы по периодам года, г. Минск, лизиметрическая станция, 1981–2012 гг.

Сезон года	Концентрация K_2O , мг/л				Поступление K_2O с осадками, кг/га			
	1981–2012	1981–1990	1991–2000	2001–2010	1981–2012	1981–1990	1991–2000	2001–2010
Весенний (03–05)	1,74	2,15	2,23	1,01	2,2	2,6	2,8	1,4
Летний (06–08)	1,57	1,44	2,62	0,88	3,1	2,8	4,5	2,2
Осенний (09–11)	1,77	1,61	2,64	0,88	2,5	2,4	3,9	1,2
Зимний (12–02)	1,36	1,24	2,01	0,84	1,7	1,4	2,5	1,1
В среднем за лизиметрический год	1,61	1,61	2,38	0,90	9,5	9,2	13,6	5,9

Т а б л и ц а 3. Поступление калия с атмосферными осадками в различные по степени увлажнения годы, 1981–2002 гг., кг/га

Показатель	Степень увлажнения года				
	влажные	близкие к среднему-летним	слабозасушливые	засушливые	очень засушливые
Годы	1982, 1985, 1990, 1993, 1998, 2006, 2008, 2009	1984, 1987, 1988, 1989, 1996, 2001, 2004, 2005, 2010	1981, 1986, 1991, 1994, 1997, 2003, 2007, 2011, 2012	1983, 1992, 1995, 2000	1999, 2002
Количество лет	8	9	9	4	2
Колебания по годам, min–max	3,8–12,6	3,0–30,8	2,0–42,1	6,2–9,7	6,5–7,2
Среднегодовое значение	8,0	9,8	12,0	7,5	6,9

Известно, что в пахотных почвах республики при одном и том же количестве выпадающих атмосферных осадков, температурном режиме, одинаковом уровне применения минеральных удобрений под культуры севооборотов величина инфильтрации атмосферных осадков и потери элементов питания при вымывании в большей степени изменяются в зависимости от типа и гранулометрического состава почв [12, 13].

Общий объем инфильтрации атмосферных осадков составлял в среднем за год (1981–2012 гг.): на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (лиз. 1, 2) – 90,9 л/м²; на той же легкосуглинистой, высококультуренной почве (агрозем, лиз. 33, 34) – 83,7 л/м²; почвообразующей породе – лессовидный суглинок, взятый из глубины 1,5–3,0 м (лиз. 11, 12) – 115,2 л/м²; легкосуглинистой, подстилаемой с глубины 0,75 м моренным суглинком (лиз. 3, 4) – 143,4 л/м²; легкосуглинистой, подстилаемой с 0,50 м рыхлым песком (лиз. 5, 6) – 126,6 л/м²; связносупесчаной, подстилаемой с глубины 0,7 м моренным суглинком с прослойкой песка на контакте (лиз. 7, 8) и рыхлосупесчаной, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлыми песками (лиз. 9, 10) – 146,3 л/м²; песчаных – 212,1 л/м². При этом количество почвенного раствора из слоя 1,0–1,5 м дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава составляло от 14,0 % (дерново-подзолистая легкосуглинистая высококультуренная почва, лиз. 33, 34) до 35,5 % (песчаная, лиз. 13–16) от суммы выпавших атмосферных осадков за год (табл. 4) [14].

Миграция калия вниз по профилю почв зависит также от многих факторов: почвенных (емкости поглощения почв, гранулометрического состава), климатических; внесенных в почву форм и доз калийных удобрений, возделываемой культуры и др. [3].

Концентрация калия в почвенных растворах из лизиметров, заполненных дерново-подзолистыми почвами разного гранулометрического состава, при одинаковых дозах внесения калийных удобрений под культуры севооборотов (среднегодовая (за 1981–2012 гг.) доза внесения калия составила K_{103} (на фоне $N_{72}P_{61}$)) различалась в зависимости от гранулометрического состава почв, глубины лизиметров, по сезонам года, десятилетиям и в различные по степени увлажнения годы. Преимущественно на всех изучаемых дерново-подзолистых почвах, за исключением рыхлосупесчаной, подстилаемой с глубины 0,5 м рыхлым песком (лиз. 9, 10), концентрация калия из лизиметров глубиной в 1,5 м была выше (в 1,2–2,3 раза) по сравнению с лизиметрами глубиной в 1,0 м. В среднем по двум лизиметрам концентрация калия изменялась от 8,5 (лиз. 5, 6) до 22,6 (лиз. 9, 10) мг/л. Показатели средних значений концентрации калия по всем почвам также подтверждают эту закономерность (табл. 5).

Если сравнивать концентрацию калия в почвенных растворах по десятилетиям, то следует отметить, что за период 1981–1990 гг. значения этого показателя были более высокие и в зависимости от гранулометрического состава почв находились в пределах от 8,1 мг/л (легкосуглинистая, подстилаемая рыхлым песком, лиз. 5, 6) до 26,5 мг/л (легкосуглинистая высококультуренная (лиз. 33, 34) и рыхлосупесчаная, подстилаемая рыхлым песком (лиз. 9, 10)). Средние концентрации калия в почвенных растворах изучаемых почв за 1981–1990 гг. составили 16,8 мг/л, за 1991–2000 гг. – 13,3 и за 2001–2010 гг. – 13,2 мг/л. Максимальные средние концентрации калия

Т а б л и ц а 5. Концентрация калия в лизиметрических растворах из пахотных почв Республики Беларусь (слой почвы 1,0–1,5 м), 1981–2012 гг., мг/л

Название почвы	Глубина размещения лизиметров			Среднее по лизиметрам , 1,0–1,5 м									
	1,0 м	1,5 м	среднее	Среднее по годам					Степень увлажнения года				
				1981–1990 гг.	1991–2000 гг.	2001–2010 гг.	влажные	оптимальные	слабозасушливые	засушливые	очень засушливые		
Дерново-подзолистая легкосуглинистая, развивающаяся на мощном лессовидном суглинке, лиз. 1, 2	8,5	13,1	10,8	14,4	10,1	9,2	14,1	9,5	8,7	13,4	7,7		
Дерново-подзолистая легкосуглинистая, развивающаяся на мощном лессовидном суглинке (высококультуренная), лиз. 33, 34	16,2	25,7	20,9	26,5	25,6	12,8	17,4	18,6	22,0	35,5	11,5		
Почвообразующая порода (лессовидный суглинок с глубины 1,5–3,0 м), лиз. 11,12	8,3	19,1	13,7	22,5	11,1	9,0	15,1	12,4	12,5	20,1	7,0		
Дерново-подзолистая суглинистая, развивающаяся на легком лессовидном суглинке, подстилаемом с глубины 0,75 м моренным суглинком, лиз. 3, 4	10,7	10,5	10,6	17,7	6,6	8,5	11,2	9,2	7,3	23,5	3,6		
Дерново-палево-подзолистая суглинистая, развивающаяся на легком лессовидном суглинке, подстилаемом с глубины 0,5 м рыхлым песком, лиз. 5, 6	7,5	9,5	8,5	8,1	7,0	10,3	12,0	6,9	7,5	8,7	5,0		
Дерново-подзолистая супесчаная, развивающаяся на супеси связной, подстилаемой с глубины 0,45 м прослойкой песка на контакте, а с глубины 0,70 м моренным суглинком, лиз. 7, 8	7,2	14,3	10,7	14,0	8,1	10,6	13,2	10,1	9,0	13,9	5,3		
Дерново-подзолистая супесчаная, развивающаяся на супеси рыхлой, сменяемой с глубины 0,3 м связным песком, а с глубины 0,5 м рыхлым песком, лиз. 9, 10	28,2	17,1	22,6	26,5	23,3	17,1	20,5	23,8	21,1	31,1	16,3		
Дерново-подзолистая песчаная, развивающаяся на связном песке, сменяемом с глубины 0,25 м рыхлым песком, лиз. 13–16	18,7	22,7	20,7	12,4	18,8	27,0	20,9	19,0	21,3	22,1	21,8		
Средние значения	12,9	15,8	14,4	16,8	13,3	13,2	15,2	13,1	13,1	20,7	9,8		
НСР ₀₅	0,84	0,96	0,90	1,16	0,84	0,87	0,93	0,81	0,81	1,27	0,60		

наблюдались в засушливые по степени увлажнения (20,7 мг/л) и во влажные (15,2 мг/л) годы. В оптимальные и слабозасушливые годы этот показатель составил 13,1 мг/л, в очень засушливые – 9,8 мг/л (см. табл. 5).

От количества просочившейся воды через слой почвы 1,0–1,5 м и концентраций элементов в почвенных растворах напрямую зависят потери калия при вымывании с нисходящими токами влаги (кг/га). Многолетние лизиметрические исследования показывают, что потери калия в окружающую среду изменялись также в зависимости от типа и гранулометрического состава дерново-подзолистых почв. Отмечена закономерность, что за период 1981–2012 гг. с увеличением глубины слоя лизиметра (1,5 м) потери калия при вымывании увеличивались на всех исследуемых дерново-подзолистых почвах (в 1,2–2,9 раза) по сравнению с глубиной лизиметров 1,0 м, что свидетельствует о высокой миграционной способности калия вниз по профилю почв. Минимальные потери калия (в среднем по двум лизиметрам) были из дерново-подзолистой легкосуглинистой, развивающейся на мощных лессовидных суглинках почве (лиз. 1, 2), которые составили 6,7 кг/га. Далее из дерново-подзолистых легкосуглинистых, подстилаемых моренным суглинком (лиз. 3, 4) или рыхлым песком (лиз. 5, 6) – 7,7–8,5 кг/га; на почвообразующей породе и дерново-подзолистой легкосуглинистой высококультуренной почве (лиз. 11, 12, 33, 34) – 11,7–12,6 кг/га; связносупесча-

ных, подстилаемых моренными суглинками (лиз. 7, 8) – 10,4 кг/га. Потери калия из дерново-подзолистой рыхлосупесчаной почвы значительно выше (28,7 кг/га, т. е. в 2,8 раза) по сравнению со связносупесчаной почвой. Максимальные потери калия при вымывании отмечаются из дерново-подзолистой песчаной почвы (40,8 кг/га), что следует учитывать сельскохозяйственным производителям при внесении калийных удобрений под сельскохозяйственные культуры (табл. 6).

Потери калия при вымывании в среднем за 1981–1990 гг. (количество атмосферных осадков составило 575 мм) из слоя 1,0–1,5 м дерново-подзолистых почв составили 13,1 кг (из рыхлосупесчаных и песчаных – 20,1–24,4 кг/га); соответственно, за 1991–2000 гг. (565 мм) – 16,2 (30,0–37,8 кг/га) и за 2001–2010 гг. (652 мм) – 18,6 кг/га (35,6–58,8 кг/га). Самые большие потери калия при вымывании были во влажные по степени увлажнения годы – их величина изменялась от 8,9 (легкосуглинистая, лиз. 1, 2) до 45,4 (песчаная, лиз. 13–16) кг/га, а в среднем по всем почвам она составила 18,9 кг/га. Далее, в засушливые годы – от 5,8 (легкосуглинистая, лиз. 1, 2) до 37,5 (песчаная, лиз. 13–16) кг/га, а в среднем по всем почвам – 17,3 кг/га. Следует отметить, что в различные по степени увлажнения годы величина потерь калия при вымывании была очень высокой на песчаных и рыхлосупесчаных почвах (см. табл. 6).

Т а б л и ц а 6. Потери калия при вымывании с лизиметрическими водами из слоя, 1,0–1,5 м пахотных почв Республики Беларусь, 1981–2012 гг., кг/га

Название почвы	Глубина размещения лизиметров			Среднее по лизиметрам, 1,0–1,5 м								
	1,0 м	1,5 м	среднее	1981–1990 гг.	1991–2000 гг.	2001–2010 гг.	Степень увлажнения года					
							влажные	оптимальные	слабозасушливые	засушливые	очень засушливые	
1. Дерново-подзолистая легкосуглинистая, развивающаяся на мощном лессовидном суглинке, лиз. 1, 2	4,7	8,7	6,7	7,6	6,6	6,5	8,9	7,1	5,5	5,8	3,7	
2. Дерново-подзолистая легкосуглинистая, развивающаяся на мощном лессовидном суглинке (высококультуренная), лиз. 33, 34	10,9	14,4	12,6	11,0	16,3	11,7	15,8	11,7	9,4	19,1	5,7	
3. Почвообразующая порода (лессовидный суглинок с глубины 1,5–3,0 м), лиз. 11, 12	6,1	17,4	11,7	16,1	13,1	7,2	14,5	12,1	9,1	15,2	3,7	
4. Дерново-подзолистая суглинистая, развивающаяся на легком лессовидном суглинке, подстилаемом с глубины 0,75 м моренным суглинком, лиз. 3, 4	6,0	9,4	7,7	9,8	7,7	6,3	9,0	7,8	6,5	9,5	4,6	
5. Дерново-палево-подзолистая суглинистая, развивающаяся на легком лессовидном суглинке, подстилаемом с глубины 0,5 м рыхлым песком, лиз. 5, 6	6,6	10,5	8,5	5,8	7,4	12,4	10,9	9,4	6,6	7,2	6,6	
6. Дерново-подзолистая супесчаная, развивающаяся на супеси связной, подстилаемой с глубины 0,45 м прослойкой песка на контакте, а с глубины 0,70 м моренным суглинком, лиз. 7, 8	6,5	14,3	10,4	10,1	11,0	9,9	12,4	9,9	9,1	11,9	7,5	
7. Дерново-подзолистая супесчаная, развивающаяся на супеси рыхлой, сменяемой с глубины 0,3 м связным песком, а с глубины 0,5 м рыхлым песком, лиз. 9, 10	25,8	31,6	28,7	20,1	30,0	35,6	34,5	27,9	24,2	32,4	22,3	
8. Дерново-подзолистая песчаная, развивающаяся на связном песке, сменяемом с глубины 0,25 м рыхлым песком, лиз. 13–16	33,3	48,3	40,8	24,4	37,8	58,8	45,4	42,6	35,9	37,5	42,7	
Средние значения	12,5	19,3	15,9	13,1	16,2	18,6	18,9	16,1	13,3	17,3	12,1	
НСР ₀₅	0,81	1,18	1,03	0,90	1,02	1,22	1,16	0,99	0,82	1,07	0,74	

В табл. 7 на отдельных почвах (слой 1,0–1,5 м) приведены экспериментальные данные по потерям калия по сезонам года и процент инфильтрационных почвенных растворов от суммы выпадающих атмосферных осадков. Эти показатели были самые высокие в весенний (март, апрель, май) период, а также в зимний (декабрь, январь и февраль – последующего года), когда почва не занята сельскохозяйственными культурами. При этом самые высокие потери калия были на дерново-подзолистых рыхлосупесчаных и песчаных почвах. Приведенные данные показывают, что внесение калия с осени на почвах легкого гранулометрического состава нецелесообразно по экономическим и экологическим причинам.

Т а б л и ц а 7. Потери калия при вымывании из пахотных дерново-подзолистых почв Республики Беларусь по сезонам года, г. Минск, лизиметрическая станция, 1981–2012 гг., кг/га

Сезон года, месяцы	Дерново-подзолистые почвы							
	легкосуглинистые (лиз. 1, 2)		связносупесчаные (лиз. 1, 2)		рыхлосупесчаные (лиз. 9, 10)		песчаные (лиз. 13–16)	
	% инфильтра- та от суммы осадков	потери, кг/га	% инфильт- рата от суммы осадков	потери, кг/га	% инфильт- рата от сум- мы осадков	потери, кг/га	% инфильт- рата от суммы осадков	потери, кг/га
Весенний (03–05)	43,0	6,0	58,9	8,0	58,0	17,1	75,8	20,1
Летний (06–08)	3,7	0,8	5,1	1,1	11,5	3,0	5,4	2,3
Осенний (09–11)	7,8	1,2	12,3	1,9	24,6	3,5	6,0	1,8
Зимний (12–02)	13,1	1,7	23,5	3,1	41,8	9,3	54,9	19,7
Сумма за лизиме- трический год	–	9,7	–	14,0	–	32,9	–	43,9

Выводы

1. Поступление калия с атмосферными осадками зависит от количества выпадающих осадков, различается по годам исследований, сезонам года и в различные по степени увлажнения годы. Среднегодовая концентрация (за 1981–2012 гг.) K^+ в атмосферных осадках в среднем составила 1,61 мг/л (при минимальном значении – 0,37 (2007 г.) и максимальном – 7,28 (1997 г.) мг/л), за 1981–1990 гг. – 1,61, 1991–2000 гг. – 2,38 и 2001–2010 гг. – 0,90 мг/л. Максимумы по содержанию калия в атмосферных осадках наблюдались в осенний (1,77 мг/л) и весенний (1,74 мг/л), далее, летний (1,57 мг/л) и зимний (1,36 мг/л) периоды.

2. Среднегодовое (за 32 года) поступление K_2O с атмосферными осадками составило 9,4 кг/га (min – 2,0 (2009 г.), max – 42,1 (1998 г.) кг/га; за 1981–1990 гг. – 9,2, 1991–2000 гг. – 13,6 и за 2001–2010 гг. – 5,9 кг/га.; более высокое поступление калия с осадками наблюдалось в слабозасушливые по степени увлажнения годы (12,0 кг/га) и в близкие к среднегодовым (оптимальные) – 9,8 кг/га.

3. При одном и том же количестве выпадающих атмосферных осадков, одинаковом уровне применения минеральных удобрений под культуры севооборотов (K_{103} на фоне $N_{72}P_{61}$) величина концентрации калия в инфильтратах лизиметрических вод в среднем за 1981–2012 гг. изменялась от 8,5 мг/л (дерново-палево-подзолистая легкосуглинистая, подстилаемая рыхлым песком) до 22,6 мг/л (дерново-подзолистая рыхлосупесчаная, подстилаемая с глубины 0,5 м рыхлым песком). На всех изучаемых дерново-подзолистых почвах, за исключением рыхлосупесчаной, подстилаемой с глубины 0,5 м рыхлым песком, концентрация калия из лизиметров глубиной в 1,5 м была выше (15,8 мг/л), чем из лизиметров глубиной в 1,0 м (12,9 мг/л); за период 1981–1990 гг. значения этого показателя составляли 16,8 мг/л, 1991–2000 гг. – 13,3 и 2001–2010 гг. – 13,2 мг/л. Максимальные средние концентрации калия наблюдались в засушливые по степени увлажнения годы (20,7 мг/л) и во влажные (15,2 мг/л). В оптимальные и слабозасушливые годы этот показатель составил 13,1 мг/л, в очень засушливые – 9,8 мг/л.

4. В зависимости от гранулометрического состава дерново-подзолистых почв ежегодно потери калия при вымывании из слоя 1,0–1,5 м составляют от 6,7 до 40,8 кг/га. При этом минимальные потери калия были из дерново-подзолистой легкосуглинистой, развивающейся на мощных лессовидных суглинках почве (6,7 кг/га); далее, из дерново-подзолистых легкосуглинистых,

подстилаемых моренным суглинком или рыхлым песком – 7,7–8,5 кг/га; из почвообразующей породы и дерново-подзолистой легкосуглинистой высококультуренной почвы – 11,7–12,6 кг/га; связносупесчаных, подстилаемых моренными суглинками, – 10,4 кг/га; рыхлосупесчаной, подстилаемой рыхлыми песками, – 28,7 кг/га. Максимальные потери калия при вымывании отмечались из дерново-подзолистой песчаной почвы – 40,8 кг/га.

5. Потери калия при вымывании в среднем за 1981–1990 гг. из слоя 1,0–1,5 м дерново-подзолистых почв составили 13,1 кг (из рыхлосупесчаных и песчаных – 20,1–24,4 кг/га); соответственно, за 1991–2000 гг. – 16,2 кг/га (30,0–37,8 кг/га) и 2001–2010 гг. – 18,6 кг/га (35,6–58,8 кг/га). Самые большие потери калия при вымывании наблюдались во влажные по степени увлажнения годы (от 8,9 кг/га (легкосуглинистая, развивающаяся на мощных лессовидных суглинках) до 45,4 кг/га (песчаная), а в среднем по всем почвам – 18,9 кг/га), далее, в засушливые годы (от 5,8 кг/га (легкосуглинистая) до 37,5 кг/га (песчаная) и в среднем по всем почвам – 17,3 кг/га).

6. Установлено, что на всех исследуемых дерново-подзолистых почвах с увеличением глубины слоя лизиметра (1,5 м) потери калия при вымывании увеличиваются (в 1,2–2,9 раза) по сравнению с глубиной лизиметров 1,0 м, что свидетельствует о высокой миграционной способности калия вниз по профилю почв.

7. Потери калия при вымывании из всех дерново-подзолистых почв самые высокие в весенний (март, апрель, май) и зимний (декабрь, январь и февраль – следующего года) периоды. При этом самые высокие потери калия отмечались из дерново-подзолистых рыхлосупесчаных и песчаных почв, что свидетельствует о нецелесообразности внесения калия с осени на почвах легкого гранулометрического состава.

Список использованных источников

1. Лизиметры в почвенных исследованиях / Л. Л. Шишов [и др.]. – М.: МГУ, 1998. – 264 с.
2. Прокошев, В. В. К вопросу о миграции калия по профилю дерново-подзолистых почв различного грансостава / В. В. Прокошев, В. В. Носов // Лизиметрические исследования в агрохимии, почвоведении, мелиорации и агроэкологии: сб. док. сим. ; Немчиновка, 29 июня – 1 июля 1999 г. / под ред. П. Д. Попова. – Москва-Немчиновка, 1999. – 240 с.
3. Потери элементов питания растений в агробиогeoхимическом круговороте веществ и способы их минимизации / И. А. Шильников [и др.]. – М.: ВНИИА, 2012. – 351 с.
4. Пакшина, С. М. Передвижение солей в почве / С. М. Пакшина. – М.: Наука, 1980. – 120 с.
5. Влияние длительного внесения калийных удобрений на катионный обмен калий – кальций в дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического и минералогического состава / Т. А. Соколова [и др.] // Агрохимия. – 1999. – № 4. – С. 5–13.
6. Иванов, И. И. Калийные удобрения на легких дерново-подзолистых почвах : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук : 06.01.04 / И. И. Иванов; Почв. ин-т им. В. В. Докучаева. – М., 1954. – 48 с.
7. Аринушкина, Е. В. Руководство по химическому анализу почв / Е. В. Аринушкина. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: МГУ, 1970. – 487 с.
8. Новиков, Ю. В. Методы исследования качества воды водоемов / Ю. В. Новиков, К. О. Ласточкина, З. Н. Болдина. – М.: Медицина, 1990. – 256 с.
9. Алекин, О. И. Руководство по химическому анализу вод суши / О. И. Алекин, А. Д. Семенов, Б. А. Скопинцев. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 270 с.
10. Почвы сельскохозяйственных земель Республики Беларусь : практ. пособие / Г. И. Кузнецов [и др.]; под ред. Г. И. Кузнецова. – Минск: Ком. по земел. ресурсам, геодезии и картографии при Совете Министров Респ. Беларусь, 2001. – 423 с.
11. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – Изд. 5-е, доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
12. Tripolskaja, I. Impact of climate variability in Lithuania and Belarus on atmospheric precipitation infiltration: lysimetric study / I. Tripolskaja, G. Pirogovskaja // Klimato veiksmu variavimo Lietuvoje ir Baltarusijoje itaka atmosferos krituliui infiltracijai: lisimetrinis tyrimas. Zemdirbyste-Agriculture. – 2013. – Vol. 100 (4). – P. 376–382.
13. Kilkus, K. Changes in water balance structure of Lithuanian rivers under different climate change scenarios / K. Kilkus, E. Staras, E. Rimkus // Valiuskevicius. Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba. – 2006. – Vol. 36 (2). – P. 3–10.
14. Пироговская, Г. В. Инfiltrация атмосферных осадков в пахотных почвах Республики Беларусь при длительном сельскохозяйственном использовании (по данным лизиметрических исследований 1981–2012 гг.) / Г. В. Пироговская // Почвоведение и агрохимия. – 2015. – № 1 (54). – С. 179–189.

Поступила в редакцию 05.01.2016