ISSN 0206-5657. Вісник Львівського університету. Серія біологічна. 2017 Випуск 75. С. 90–98
Visnyk of the Lviv University. Series Biology. 2017. Issue 75. P. 90–98

УДК 574:635.21

ОСОБЛИВОСТІ ПОЗАКОРЕНЕВОГО НАДХОДЖЕННЯ ^{134}Cs У НАДЗЕМНУ ВЕГЕТАТИВНУ МАСУ ТА БУЛЬБИ КАРТОПЛІ

М. Вінічук[1*], К. Розен[2]

[1] Житомирський державний технологічний університет
вул. Черняховського, 103, Житомир 10005, Україна
[2] Шведський університет сільськогосподарських наук
7014, SE-75007, Уппсала, Швеція
e-mail: mykhailo59@gmail.com

Показано, що у разі «мокрого» випадіння радіонукліда (^{134}Cs) на вегетуючі рослини на початку вегетації (масові сходи – бутонізація) питома активність ^{134}Cs у бульбах картоплі на час збирання врожаю у середньому за три роки досліджень спостерігалася на рівні 12–130 Бк · кг$^{-1}$ протягом трьох років досліджень. При обприскуванні рослин у середині вегетації (цвітіння – початок формування бульб) питома активність радіонукліда в бульбах на час збирання урожаю виявилася найвищою і в середньому для трьох років коливалась у межах від 182 до 870 Бк·кг$^{-1}$. Якщо радіонуклід випадав у другій половині вегетації (в'янення надземної маси рослин – дозрівання бульб), питома активність ^{134}Cs при збиранні врожаю знову знизилась і була на рівні 70–310 Бк·кг$^{-1}$ протягом трьох років досліджень. Ще нижчі рівні питомої активності радіонукліда спостерігались у бульбі картоплі при обприскуванні рослин у другій половині серпня (закінчення росту – дозрівання бульб).

Ключові слова: радіоцезій-134, картопля, бульба, надземна маса рослин, «мокре» випадіння

Чорнобильська катастрофа у 1986 р. і ядерна аварія на *АЕС Фукусіма*-1 у 2011 р. засвідчують, що подібні випадки, в результаті яких великі площі земель забруднюються радіоактивними речовинами, ймовірні і в майбутньому. Забруднення радіонуклідами можуть зазнавати також землі сільськогосподарських угідь, зокрема в період вегетації рослин, що унеможливлює використання останніх як продовольчих культур [1]. За час, що минув після аварії на Чорнобильській АЕС та у Фукусімі, було зібрано велику кількість даних, які дають змогу оцінити перехід радіонуклідів із ґрунту в рослини, але інформації про забруднення сільськогосподарських культур у результаті випадіння радіоактивних опадів безпосередньо у вегетаційний період недостатньо. Рівень питомої активності радіонуклідів у продуктах рослинництва значною мірою визначається тим, як забруднені радіонуклідами продукти споживає людина (продукти харчування, корм для тварин або в переробленому вигляді).

Якщо випадіння відбувається наприкінці періоду вегетації, тобто в період дозрівання врожаю, то шлях радіонуклідів до людини може бути коротким, особливо коли останні безпосередньо перехоплюються надземними частинам рослин, зокрема тими, що можуть бути спожиті як продукти харчування. Відомо, що рівень забруднення сільськогосподарських культур радіонуклідами під час вегетації залежить від цілої низки факторів, у тому числі і пори року, під час якої відбувається осідання радіонуклідів [3]. Серед інших факторів важливими є площа листової поверхні, величина наземної біомаси та фази росту рослин [12].

Також відомо, що зі всієї кількості радіоцезію (у даному випадку ^{137}Cs), який випав на листову поверхню рослин під час вегетації картоплі, до бульб протягом одного місяця

© Вінічук М., Розен К., 2017

може перейти понад 40 % [14]. Рівень забруднення бульб картоплі майбутнього врожаю також значною мірою залежить від фази росту і розвитку рослини на час випадіння радіоактивного ^{134}Cs [9]. Картопля, як правило, характеризується відносно низькими значеннями коефіцієнтів переходу радіоцезію, порівняно з іншими продовольчими культурами [16]. Разом з тим, частка цього продукту в раціоні харчування досить висока. Так, в Україні споживання картоплі в середньому становить 139,8 кг на людину протягом року [7]. Відомості про те, як залежить рівень забруднення сільськогосподарських культур від фенологічної фази їхнього росту і розвитку на час випадіння радіонуклідів, будуть корисними для прогнозування можливого використання врожаю даної культури як продукту харчування. На сьогодні відомі лише окремі публікації з експериментальними даними [9, 15, 17], що показують, яким чином рівні забруднення надземної маси рослин і бульб картоплі радіоцезієм залежать від того, в якій фазі росту й розвитку радіонуклід надходить на поверхню рослин. У ході експерименту, проведеного протягом трьох років у польових умовах, було досліджено, яким чином ^{134}Cs, нанесений на листову поверхню рослин картоплі шляхом обприскування вегетуючих рослин у різні фази росту й розвитку водним розчином радіонукліда («мокре» випадіння), переходить із листя у бульби картоплі.

Метою дослідження було встановити фенологічну фазу росту й розвитку рослин картоплі, при якій у разі «мокрого» випадіння ^{134}Cs рівень надходження цього радіонукліда в бульби картоплі буде найвищим. Наша вихідна гіпотеза полягала у тому, що забруднення бульб картоплі ^{134}Cs є найвищим, коли рослини зазнають радіонуклідного забруднення у формі «мокрого» випадіння на початку фази цвітіння, тобто у період інтенсивного росту надземної біомаси (фаза III) і протягом фази IV, тобто інтенсивного приросту маси бульб. Крім того, було досліджено, яким чином терміни збирання врожаю картоплі впливають на рівень забруднення бульб радіоцезієм. Також було показано, яка частина активності ^{134}Cs переходить до бульб у відсотках від загальної активності радіонукліда, що надійшла на одиницю площі посівів. Отримані дані можуть бути використані для прогнозування імовірних рівнів забруднення цезієм картоплі у разі «мокрого» випадіння радіонуклідів.

Матеріали та методи

Вегетуючі рослини картоплі обприскували розчином ^{134}Cs у різні фенологічні фази росту і розвитку впродовж трьох вегетаційних періодів – 1990-го, 1991-го та 1992-го років (зазначені тут як протягом 1-го, 2-го та 3-го років) на дослідній станції поблизу м. Уппсала.

Дослід проводили за схемою, що наведена у табл. 1. Мінеральні добрива вносили з розрахунку N96, P42 K78 кг/га навесні кожного року [5, 6]. Ранньостиглий сорт картоплі «Марія» висаджували 30, 29 і 25 травня у 1-й, 2-й і 3-й рік відповідно з розрахунку 3 бульби картоплі по діагоналі в кожній із чотирьох мікроділянок розміром 0,25 м^2, об'єднаних у блоки щороку. Після появи сходів рослини картоплі кожного блоку обприскували розчином ^{134}Cs у той же день, згідно з рандомізованою блок-схемою. Ґрунт дослідної ділянки супіщаний, сходи рослин на поверхні ґрунту з'являлися через 3–4 тижні після посадки. Опадів за період вегетації випадало 181, 236 і 220 мм відповідно у 1-й, 2-й і 3-й рік. Середня температура повітря протягом вегетаційного періоду для трьох років становила 10 °C у травні, 15 °C у червні та 16 °C у серпні.

Перше обприскування проводили на момент появи перших 2–4 листків, подальші – відповідно до настання фенологічних фаз росту рослин. Водний розчин готували шляхом розбавлення радіонукліда (^{134}Cs) у 0,1 н HCl, з подальшим розведенням водою до об'єму 0,25 л. Обприскування рослин проводили шляхом дощування з розрахунку 1 мм розчину на кожну ділянку, що забезпечувало таку кількість ^{134}Cs на 1 м^2 площі, кБк: 1-й рік (перше обприскування, 27/06) – 25,36, друге, третє і четверте – 5,72 кожне; 2-й рік (перше об-

прискування, 19/06), друге, третє і четверте – 19,55 кожне; 3-й рік (перше обприскування, 11/06) – 19,55, друге та третє – 13,03 кожне (табл. 1).

Таблиця 1

Схема досліду, дати обприскування та кількість розчину ^{134}Cs, кБк · м^2

Рік	Обприскування			
	перше	друге	третє	четверте
1-й	27/06*	12/07	23/07	07/08
	25,36	5,72	5,72	5,72
2-й	19/06	05/07	22/07	05/08
	19,55	13,03	13,03	13,03
3-й	11/06	25/06	15/07	05/08
	19,55	13,03	13,03	13,03

Примітка: * у чисельнику – дата обприскування, у знаменнику – кількість розчину ^{134}Cs

Зразки надземної маси рослин (листки та стебла) відбирали шляхом зрізання рослин на висоті 5 см над поверхнею ґрунту, а бульби картоплі (після їхньої появи) в той же день, коли і відбір проб листя. Перші зразки надземної маси рослин відбирали 29/06 (через 2 дні після обприскування) в 1-й рік, 23/07 (через 34 дні після обприскування) у 2-й рік і 26/06 (через 15 днів після обприскування) у 3-й рік. Перші зразки бульби були зібрані 08/08 (через 42 дні після обприскування) в 1-й рік, 23/07 (через 34 дні після обприскування) у 2-й рік і 20/07 (через 37 днів після обприскування) у 3-й рік.

Фенологічні фази росту і розвитку картоплі відповідно до [5] були такі: фаза I (кінець травня – початок червня, період між висаджуванням і появою перших сходів); фаза II (друга половина червня, масові сходи, формування листя, стебел і кореневої системи, бутонізація); фаза III (кінець червня – перша половина липня, цвітіння, початок формування бульб); фаза IV (кінець липня – початок серпня, наростання бульб); фаза V (серпень, в'янення надземної маси рослин, дозрівання бульб). Протягом 1-го та 2-го років зразки надземної маси рослин і бульб відбирали з двох або чотирьох повторностей, а протягом 3-го року – з чотирьох повторностей. Щороку в досліді було 4 блок-схеми. Зразки надземної маси рослин та бульб доводили до сухої ваги (с.в.) в сушильній шафі при температурі ≈ 80 °C протягом ≈ тижня. Перед сушінням бульби картоплі розрізали на пластинки завтовшки ≈ 2 мм. Висушені зразки тонко подрібнювали і просівали крізь сито з розмірами отворів 2 мм.

Визначення активності ^{134}Cs у зразках проводили з використанням сцинтиляційного (NaI) авто-гамма-детектора та напівпровідникового (HPGe) детектора. Отримані дані перерахували, взявши до уваги період напіврозпаду на дату відбору проб. Статистичну обробку даних проводили з використанням пакета програмного забезпечення Minitab Minitab® 16.2.4.

Коефіцієнт переходу радіонукліда (КП) розраховували як відношення питомої активності радіонукліда в рослинному матеріалі (Бк · кг$^{-1}$) до щільності забруднення ґрунту після обприскування (Бк · м$^{-2}$) [11]. Для оцінки переходу радіонукліда з надземної маси рослин до бульб використовували таке співвідношення: ^{134}Cs у надземній масі рослин (Бк · м^2) / ^{134}Cs у бульбі (Бк · м^2), м^2 (кг$^{-1}$).

Результати і їхнє обговорення

Загалом питома активність ^{134}Cs у зразках надземної маси рослин картоплі, які відбирали у перші кілька днів після обприскування, значно перевищувала питому активність ^{134}Cs у зразках, які відбирали у подальші фенологічні фази росту і розвитку рослин. Питома активність ^{134}Cs у надземній масі рослин, які відбирали через деякий час після обпри-

скування, помітно знижувалась і залишалася на відносно низькому рівні. При випадінні радіонукліда в середині вегетації (обприскування у період 15–24/07, фаза III, цвітіння) питома активність ^{134}Cs у надземній масі рослин виявилася найвищою і досягала значень 8,5–8,7 кБк·кг$^{-1}$ (табл. 2). При обприскуванні рослин картоплі на пізніших фазах росту і розвитку (серпень, фаза IV–V, наростання та дозрівання бульб) питома активність надземної маси рослин за ^{134}Cs також була високою (12,6–21,1 кБк·кг$^{-1}$). Це пояснюється відносно коротким проміжком часу, що минув від обприскування до відбору зразків.

Таблиця 2

Питома активність ^{134}Cs у надземній масі рослин картоплі, кБк · кг$^{-1}$ с.в.

Рік, дата збирання урожаю / відбирання зразків	Обприскування, дата			
	перше	друге	третє	четверте
1-й	27/06	12/07	23/07	07/08
08/08	4,89±0,13	8,49±1,60	8,66±1,70	9,86±0,71
29/08	5,69±0,44	10,8±6,9	8,51±1,40	10,6±3,30
12/09	–	–	–	–
2-й	19/06	05/07	22/07	05/08
06/08	0,55±0,38	3,66±0,91	8,57±1,43	21,1±0,66
16/08	0,37±0,22	2,52±0,38	–	12,6±1,37
27/08	–	–	5,07±0,62	8,17±0,10
3-й	11/06	25/06	15/07	05/08
16/07	0,17±0,07	0,36±0,12	0,21±0,08	–
06/08	0,12±0,07	0,27±0,05	0,66±0,20	0,10±0,06
21/08	0,11±0,08	0,24±0,04	0,84±0,16	–

Поступове зниження питомої активності ^{134}Cs у надземній частині рослин спостерігали, ймовірно, за рахунок втрати радіоактивності з поверхні листя через дію таких природних факторів як вітер і дощ. У результаті частина нанесеного на поверхню листя ^{134}Cs, ймовірно, надходила безпосередньо у ґрунт. Зниження питомої активності ^{134}Cs у надземній масі рослин з часом також, очевидно, відбувалося за рахунок збільшення фітомаси рослин і, відповідно, «біологічного» розбавлення радіонукліда.

Підвищення концентрації ^{134}Cs у надземній масі рослин, яке спостерігалось у всі терміни відбору зразків при обприскуванні рослин картоплі у фазах II і III, могло бути пов'язане зі збільшенням листкової поверхні [2, 13]. Для утворення бульб картоплі необхідні вуглеводи, що утворюються у процесі фотосинтезу, інтенсивність якого безпосередньо пов'язана з розвитком листкової поверхні [4, 10]. У період максимального розвитку листової поверхні остання перехоплює значну частину радіоактивності, в результаті чого питома активність ^{134}Cs у надземній масі рослин відповідно зростає.

Висока питома активність ^{134}Cs у надземній масі рослин картоплі при обприскуванні на більш пізніх фазах росту й розвитку (фаза IV, 05–15/08 та фаза V, 16–28/08) може також пояснюватися зменшенням інтенсивності надходження ^{134}Cs до бульб. Ріст і розвиток бульб у цей період сповільнюється і, зрештою, зупиняється, а відповідно і призупиняється транспорт речовин із листків до бульб. Крім того, при обприскуванні на більш пізніх фазах росту й розвитку значно скорочується проміжок часу між випадінням радіонукліда та збиранням урожаю.

Величини питомої активності ^{134}Cs у бульбах картоплі варіювали залежно від того, у яку фазу росту й розвитку проводили обприскування рослин, і в цілому виявилися на 1–2 порядки нижчими, ніж у надземній масі рослин. Так, у 1-й рік досліду питома активність ^{134}Cs у бульбах варіювала у межах від 29 до 180 Бк·кг$^{-1}$, у 2-й рік – у межах від 7 до 870 Бк·кг$^{-1}$, а у 3-й рік – 104-860 Бк · кг$^{-1}$ (табл. 3). Результати попередніх досліджень свідчать, що питома активність ^{137}Cs у бульбах картоплі при кореневому надходженні радіонукліда

із ґрунту в рослини, як правило, невисока – у постчорнобильський період (1986–2005 рр.) вона варіювала в межах 0,1–2,0 Бк · кг$^{-1}$ [16], або 0,1-1,1 Бк · кг$^{-1}$ [8].

Таблиця 3

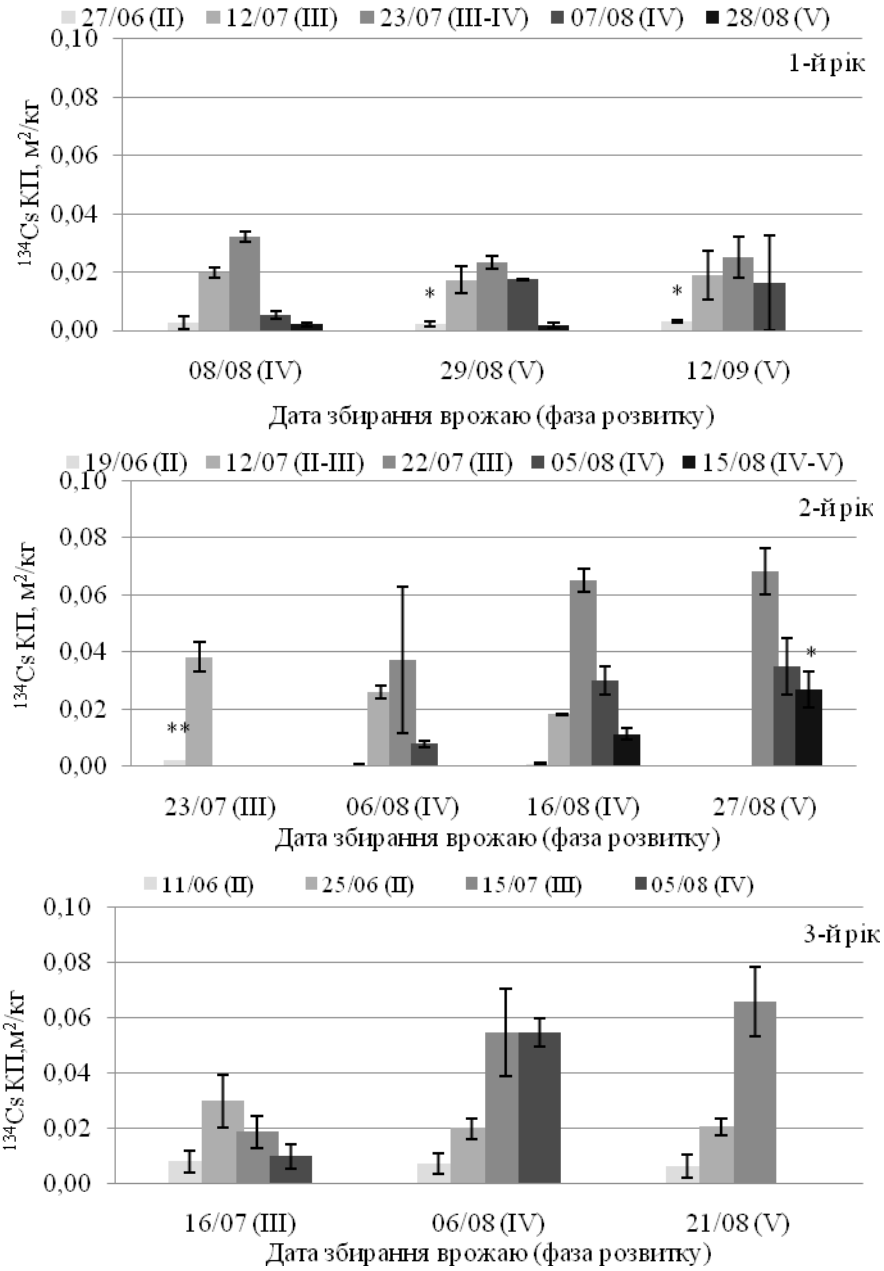
Питома активність ^{134}Cs у бульбах картоплі, Бк · кг$^{-1}$ с.в.

Рік, дата збирання урожаю / відбирання зразків	Обприскування			
	перше	друге	третє	четверте
1-й	27/06	12/07	23/07	07/08
08/08	61,5±53	110±10	182±10	29,5±8
29/08	55,0±19	94,5±25	129±13	98,0±1
12/09	70,0±15	102±45	137±37	89,5±1
2-й	19/06	05/07	22/07	05/08
06/08	7,50±9,2	330±27	869±265	102±17
16/08	17,5±9,2	231±28	829±52	388±65
27/08	–	–	856±103	445±126
3-й	11/06	25/06	15/07	05/08
16/07	169±72	362±122	214±75	–
06/08	119±72	268±47	659±203	104±58
21/08	109±77	238±38	842±156	–

При першому обприскуванні рослин картоплі (після появи сходів) навіть за високих рівнів забруднення надземної маси рослин відносно невелика частина радіонукліда надходила у бульби картоплі. З часом питома активність радіонукліда в надземній масі рослин зменшувалась, тоді як у бульбах картоплі він накопичувався і його питома активність тут зростала. Очевидно, що транслокація радіонукліда з надземної маси рослин до бульб є відносно швидким процесом. Так, при обприскуванні рослин на ранніх фазах їхнього росту й розвитку (фаза II, 11–27/06, формування листя, стебел і кореневої системи, бутонізація), питома активність ^{134}Cs у бульбах картоплі в середньому для різних термінів збирання урожаю становила ≈ 60 Бк·кг$^{-1}$ у 1-й рік, ≈ 12 Бк·кг$^{-1}$ у 2-й рік і ≈ 130 Бк·кг$^{-1}$ у 3-й рік (табл. 3). При обприскуванні рослин у більш пізні фенологічні фази питома активність бульб картоплі за ^{134}Cs зростала. Так, при обприскуванні рослин у фазу цвітіння (фаза III, 15–23/07) середній рівень питомої активності ^{134}Cs у бульбах в середньому для різних термінів збирання урожаю був найвищим для 2-го і 3-го року – 870 і 840 Бк·кг$^{-1}$, відповідно, і трохи нижчим – 182 Бк·кг$^{-1}$ для 1-го року дослідження. Коли випадіння радіонукліда на вегетуючі рослини мало місце приблизно на 2 тижні пізніше (фаза IV, інтенсивний приріст бульб, 05–07/08), рівень питомої активності ^{134}Cs у бульбах картоплі в середньому для різних термінів збирання урожаю виявився приблизно удвічі нижчим і становив ≈ 70, ≈ 310 і ≈ 100 Бк·кг$^{-1}$ для 1-го, 2-го і 3-го років відповідно. Ще нижчу активність радіонукліда спостерігали у бульбах картоплі, якщо випадіння радіонукліда мало місце у другій половині серпня (кінець IV фази – початок V фази).

Коефіцієнти переходу ^{134}Cs у випадку «мокрого» його випадіння для бульб представлені на рисунку. Значення КП ^{134}Cs для надземної маси рослин варіювали в діапазоні від 0,17 до 1,98 у 1-му році, від 0,02 до 1,67 у 2-му році та від 0,03 до 2,13 у 3-му році. Значення КП ^{134}Cs для бульб коливалися відповідно між 0,0019 і 0,03 у 1-му році, між 0,0004 і 0,07 у 2-му році і між 0,006 і 0,07 у 3-му році. Отже, величини КП ^{134}Cs для надземної фітомаси рослин картоплі у разі «мокрого» випадіння радіонукліда є на 1-2 порядки вищі, ніж КП ^{134}Cs для бульб, залежно від дати випадіння радіонукліда та дати відбору зразків (збирання врожаю). При випадінні радіонукліда на початку росту і розвитку рослин (фаза II, 11–27/06) усереднені величини КП ^{134}Cs для надземної маси рослин для всіх дат відбору зразків виявилися найнижчими: 0,28, 0,03 і 0,07 для 1-го, 2-го і 3-го року відповідно. Усереднені величини КП ^{134}Cs для бульб картоплі при обприскуванні рослин у цей же період

для всіх дат збирання урожаю також виявилися найнижчими: 0,003, 0,001 і 0,007 для 1-го, 2-го і 3-го років відповідно (див. рисунок).



Коефіцієнти переходу (^{134}Cs КП, м^2/кг) у бульби картоплі залежно від фенологічної фази розвитку рослин на час їх обприскування і термінів відбору зразків (збирання врожаю), M±м. n=2, *n=4, **n=1, для 3-го року n=4. Фенологічні фази розвитку картоплі: II – масові сходи, бутонізація; III – початок цвітіння; IV – наростання маси бульб; V – відмирання надземної маси рослин і дозрівання бульб

Найвищі значення КП ^{134}Cs для бульб спостерігали при обприскуванні вегетуючих рослин картоплі на більш пізніх стадіях їхнього росту і розвитку та на початкових стадіях формування бульб (фаза III, початок формування бульб і фаза IV, наростання бульб, 15/07 – 07/08). Так, при обприскуванні рослин розчином радіонукліда у ці фази значення КП ^{134}Cs становили 1,56, 0,89 і 1,21 для листя і 0,02, 0,05 і 0,04 для бульб у 1-й, 2-й і 3-й рік досліду відповідно. У фазі III (цвітіння, початок формування бульб) кінчики підземних столонів починають набухати, на кінцях яких утворюються нові бульби, в той час як фаза IV (наростання бульб) має вирішальне значення як для величини урожаю бульб, так і для їхньої якості. При обприскуванні рослин розчином радіонукліда у другій половині вегетації (16–28/08, фаза V, в'янення надземної маси рослин, дозрівання бульб) перехід радіонукліда з надземної частини до бульб сповільнюється і питома активність останніх знижується. Так, КП ^{134}Cs для бульб при обприскуванні рослин картоплі у цю фазу варіювали у межах від 0,002 до 0,023 1-й і 2-й рік дослідження відповідно залежно від дати відбору зразків (збирання врожаю) картоплі.

На рис. 1 показано узагальнений результат щодо впливу обприскування вегетуючих рослин картоплі розчином радіонукліда у різні фенологічні фази росту й розвитку, а також впливу термінів відбору зразків (збору врожаю) картоплі на величину КП ^{134}Cs в бульби. З метою отримання дозрілих бульб картоплі, зразки відбирали переважно в серпні (фаза IV та V) кожного року. Як видно з рисунка, спостерігаються чіткі максимуми значень КП ^{134}Cs кожного року досліджень, які відповідають термінам проведення обприскування у другій половині липня (13–23/07). Загалом, ці дати збігаються з третьою фенологічною фазою росту й розвитку рослин – цвітіння та початок формування бульб картоплі. Обприскування рослин картоплі розчином радіонукліда на початкових фазах вегетації (фаза II, масові сходи, бутонізація) помітно зменшувало перехід ^{134}Cs у бульби картоплі та на момент збирання врожаю КП ^{134}Cs виявились у 2–3 рази нижчими ніж при обприскування у фазу бутонізації. При «мокрому» випадінні радіонукліда на більш пізніх стадіях росту й розвитку картоплі (фаза IV, інтенсивний ріст бульб) спостерігали ще помітніше зниження інтенсивності переходу радіоцезію з надземної маси рослин до бульб картоплі: величини КП ^{134}Cs при цьому були приблизно у 4 рази нижчими, порівняно з обприскуванням у фазу бутонізації (фаза III).

Подібний ефект, хоча і менш виражений, спостерігався і для надземної маси рослин. Найвищі значення КП ^{134}Cs спостерігали у зразках листя та стебел, які відбирали одночасно зі збиранням врожаю бульб у серпні (фаза IV і V). Високі значення КП ^{134}Cs також спостерігали для надземної маси рослин у разі відбирання зразків у наступний день або у ближчі після обприскування дні. Зразки надземної маси рослин, які відбирали пізніше, характеризувалися нижчими значеннями КП ^{134}Cs.

При «мокрому» випадінні ^{134}Cs безпосередньо на вегетуючі рослини частину радіонукліда затримувала надземна фітомаса, поглинала листова поверхня й інші частини рослин. Частка ^{134}Cs, що була затримана і надійшла у рослини, виражена у відсотках від загальної активності радіонукліда, що надійшла в результаті обприскування на одиницю площі (1 м^2), варіювала залежно від термінів обприскування та фенологічних фаз від 0,2 до 16,3 % для листя і від 0,1 до 7,1 % для бульб. Отже, у разі «мокрого» випадіння ^{134}Cs безпосередньо на вегетуючі рослини ними сумарно (надземна маса рослин + бульби) може бути перехоплено і затримано ≈ 9 % від загальної кількості радіонукліда, що надійшла на одиницю площі. Наведені оцінки є досить наближеними, оскільки вони значною мірою залежать від ступеня розвитку надземної фітомаси рослин. Хоча питома активність роз-

чину при першому обприскуванні у 2-й і 3-й рік була у 1,5 разу вищою ніж наступних, частка радіонукліда, що надійшла до рослин, була меншою, насамперед через недостатньо розвинену листкову поверхню рослин (фаза I, 11–19/06, поява сходів). При подальших обприскуваннях рослин розчином із нижчою питомою активністю радіонукліда, але краще розвиненій надземній масі рослин остання затримувала більшу частку радіонукліда.

Також встановлено, що у разі «мокрого» випадіння ^{134}Cs на вегетуючі рослини бульби можуть накопичувати у собі майже удвічі більше радіонукліда, ніж надземна маса рослин залежно від фази росту й розвитку рослин на час випадіння. КП ^{134}Cs з надземної маси рослин до бульб у разі випадіння радіонукліда у кінці фази III (перша половина липня, цвітіння, початок формування бульб) і на початку фази IV (кінець липня, наростання бульб) варіювали у межах 1,5–2,3 для 2-го року та 1,3 у 3-му році. При обприскуванні рослин картоплі на початку (фаза II) або у кінці (фаза V) вегетації КП ^{134}Cs з надземної маси рослин до бульб були значно нижчими і не перевищували 0,4–0,89 для 2-го і 3-го року.

Отже, рівень забруднення зрілих бульб картоплі за ^{134}Cs у разі «мокрого» його випадіння на вегетуючі рослини визначається фенологічною фазою росту і розвитку, під час якої таке випадіння мало місце. Найвищі значення питомої активності ^{134}Cs у бульбах спостерігаються при обприскуванні вегетуючих рослин у середині вегетаційного періоду (фаза III; цвітіння, початок формування бульб; кінець червня – перша половина липня). Результати показують, що при випадінні радіонукліда в період цвітіння та на початку формування бульб і при щільності радіоактивного забруднення ґрунту на рівні ≈ 10 кБк·м^2 за ^{134}Cs, питома активність його у бульбах картоплі може досягати понад 600 Бк · кг$^{-1}$, що на порядок перевищує допустимі рівні його вмісту згідно з діючими нормами. При збиранні врожаю картоплі у більш пізні строки (друга половина серпня) питома активність бульб, як правило, вища ніж при викопуванні їх у ранні терміни (перша половина серпня). Для кількісної оцінки міграції радіонукліда у рослинах картоплі під час подібних експериментів у майбутньому слід враховувати біомасу як надземної частини рослин, так і бульб.

Робота виконана на кафедрі ґрунтів і навколишнього середовища Шведського університетові сільськогосподарських наук. Автори висловлюють подяку Шведському університетові сільськогосподарських наук і Житомирському державному технологічному університету за фінансову підтримку цього проекту. Автори також вдячні професорові Å. Eriksson і MS студентові M. Stenmark за цінні поради та допомогу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРТУРИ

1. *Anspaugh L., Simon L., Gordeev K.* et al. Movement of radionuclides in terrestrial ecosystems by physical processes // Health Physics. 2002. Vol. 82. P. 669–679.
2. *Bengtsson S., Eriksson E., Gärdenäs A.* et al. Accumulation of wet-deposited radiocaesium and radiostrontium by spring oilseed rape (*Brássica napus* L.) and spring wheat (*Tríticum aestívum* L.) // Environ. Pollut. 2013. Vol. 182. P. 335–342.
3. *Bengtsson S., Gärdenäs A., Eriksson J.* et al. Interception and retention of wet-deposited radiocaesium and radiostrontium on a ley mixture of grass and clover // Sci. Total Environ. 2014. Vol. 497–498. P. 412–419.
4. *Bodin B., Svensson B.* Potatis och potatisproduktion. Institutionen för växtodlingslära, SLU, Uppsala. (In Swedish). 1996. Pp. 1–127.
5. *Eriksson Å., Haak E., Rosén K.* Retention of simulated fallout nuclides in agricultural crops. I. Experiments on ley. Department of Radioecology, Report SLU-REK-80. Uppsala. 1998a. Pp. 1–32.
6. *Eriksson Å., Haak E., Rosén K.* Retention of simulated fallout nuclides in agricultural crops. II. Deposition of Cs and Sr on grain crops. Department of Radioecology. Report SLU-REK-81, Uppsala. 1998b. pp. 136.

7. *FAO*. Electronic resource: http://faostat3.fao.org/download/FB/CC/E
8. *Franić Z., Petrinec B., Marović G.* Radiocaesium Activity Concentrations in Potatoes in Croatia after the Chernobyl Accident and Dose Assessment // J. Environ. Sci. Heal. B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes. 2007. Vol. 42(2). P. 211–217.
9. *Gerdung S., Pöllot M., Fischer P.* et al. Contamination of wheat, rye and potoes by foliar application of ^{134}Cs // J. Radioanal. Nucl. Ch. 1999. Vol. 240(2). P. 451–454.
10. *Harris P.* The Potato Crop. The Scientific Basis for Improvement. Ed. P. M. Harris. London: Chapman and Hall. 1978. Pp. 730.
11. *IAEA*. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments // Technical Reports Series, No. 472. Vienna. 2010. 194 pp.
12. *Kinnersley R., Goddard A., Minski M., Shaw G.* Interception of caesium-contaminated rain by vegetation // Atmos. Environ. 1997. Vol. 31. 1137–1145.
13. *Pröhl G*. Interception of dry and wet deposited radionuclides by vegetation // J. Environ. Radioactiv. 2009. Vol. 100. P. 675–682.
14. *Oestling O., Kopp P, Burkart W.* Foliar uptake of cesium, iodine and strontium and their transfer to the edible parts of beans, potatoes and radishes // Int. J. Radiat. Appl. & Inst. C. Radiation Physics and Chemistry. 1989. Vol. 33(6). P. 551–554.
15. *Rosén K., Vinichuk M.* Interception and transfer of wet-deposited ^{134}Cs to potato foliage and tubers // J. Environ. Radioact. 2016. Vol. 151(1). P. 224–232.
16. *Tsukada H., Nakamura Y.* Transfer of ^{137}Cs and stable Cs from soil to potato in agricultural fields // Sci. Total Environ. 1999. Vol. 228(2–3). P. 111–120.
17. *Voigt G., Pröhl G., Müller H.* Experiments on the seasonality of the cesium translocation in cereals, potatoes and vegetables // Radiat. Environ. Bioph. 1991. Vol. 30(4). P. 295–303.

Стаття: надійшла до редакції 03.10.16

доопрацьована 03.02.17

прийнята до друку 22.02.17

FOLIAR UPTAKE OF ^{134}Cs BY POTATO FOLIAGE AND TUBERS

M. Vinichuk[1], K. Rosén[2]

[1]Zhytomyr State Technological University
103, Chernyakhovsky St., Zhytomyr 10005, Ukraine
[2]Swedish University of Agricultural Sciences
SLU, Box 7014, SE-75007, Uppsala, Sweden
e-mail: mykhailo59@gmail.com

Application of the radionuclide (^{134}Cs) early in the growing season (growth stage II; plant establishment) resulted in low ^{134}Cs activity concentration in potato tubers across sampling occasions (range 12–130 Bq · kg^{-1} dry weight (D.W.) for 3 years). Following radionuclide deposition in the middle of the growing season (growth stage III; tuber initiation), ^{134}Cs activity concentration in tubers across sampling occasions was found to be highest (range 182–870 Bq · kg^{-1} D.W. for 3 years). When the radionuclide was sprayed on at later stages (growth stage IV = tuber bulking), ^{134}Cs activity concentrations in tubers across sampling dates decreased (range 70–310 Bq · kg^{-1} D.W. for 3 years). Deposition in the second half of August (late growth stage, tuber maturation) resulted in yet lower ^{134}Cs activity concentration in tubers.

Keywords: radiocaesium, potatoes, foliage, tubers, «wet» deposition