

УДК 556.114.679; 502; 574

ВЫСОКОИНТЕНСИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ПОЧВ В НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ НА ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЦЕЗИЕМ ТЕРРИТОРИЯХ

С. В. Василенков, к. т. н., доцент ФГБОУ
ВО Брянский ГАУ, poivp@bgsha.com,
Н. М. Белоус, д. с.-х. н., профессор
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ,
poivp@bgsha.com,
В. Ф. Василенков, д. т. н., профессор
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ,
poivp@bgsha.com,
О. Н. Демина, к. т. н., доцент ФГБОУ ВО
Брянский ГАУ, ol20nik@yandex.ru

Целью исследований является разработка инженерно-технических мероприятий, направленных на реабилитацию радиоактивнозагрязненных территорий; улучшение экологической обстановки в населенных пунктах за счет снижения дозы внутреннего и внешнего облучения людей. Фон ионизирующего излучения в полевых условиях определялся стандартными дозиметрическими приборами. Отбирались пробы почвы, грунта в соответствии с существующими положениями на проведение полевых исследований. С отобранными образцами изучались в лаборатории процессы водной миграции радионуклидов. Изменение радиоактивности проб в ходе опытов определялось на радиометре с 15-ю повторами каждого измерения. Относительная ошибка измерений не более 2—3 %. Общее количество выполненных лабораторно-полевых опытов 108, промывных поливов 890. Для оптимального использования мелиоративных мероприятий разработаны технологии выщелачивания радионуклидов из почвы, задачей которых является создание турбулентной фильтрации в капиллярах почв. Технологии орошения ориентированы на применение дождевальной техники, технологии промывки при затоплении «цезиевых пятен» — на использование талых вод в осенний период. Предлагаемая технология поливов затоплением поверхности почв обеспечивает извлечение цезия, в среднем, за разовый полив 1,3—1,8 %.

The object of our research was to develop engineering activities aimed on rehabilitation of contaminated territories; on improvement of ecological conditions in human settlements at the expense of lower doses of internal and external irradiation. Background ionizing radiation in the field was determined by the standard dosimetry equipment. Samples of soil were selected in accordance with existing regulations in field studies conducting. With selected samples in the laboratory it were studied the processes of water migration of radionuclides. The change of radioactivity in experimental determined at radiometer with 15-th repetitions of each dimension. The relative error of measurement was not more than 2—3 %. The total number of laboratory and field experiments is 108, leaching irrigations are 890. For the purpose of optimum use of meliorative actions, it is developed the technologies of leaching of radio nuclides from the soil, which help to create a turbulent filtration in capillaries of soils. Technologies of irrigation are focused on using of irrigation machines, technology of washing when flooding «cesium spots» - on using of snow melt water during the autumn period. The offered technology of watering with flooding of a surface of soils provides cesium extraction, on average, at single watering of 1,3—1,8 %.

Ключевые слова: технологии промывки почв, цезий-137, снижение уровня радиоактивного загрязнения, реабилитация радиоактивнозагрязненных территорий, мелиоративные мероприятия, выщелачивание цезия.

Key words: leaching technology, cesium-137, water treatment, reducing the dose of radiation, rehabilitation of contaminated territories, meliorative actions, leaching of cesium.

Радионуклидами Чернобыльской аварии на территории России в наибольшей степени загрязнены ландшафты полесий и ополей с преобладающими дерново-подзолистыми песчаными и супесчаными почвами. Для ландшафта ополей характерны холмистый рельеф, густая овражно-балочная сеть с расчленением до 2,5 км /км², обилие карстовых и суффuzionно-просадочных форм, развития эрозионных процессов. Блюдца в западинах имеют размеры в диаметре 25—75 м, глубина 1,5—2,5 м. На некоторых водораздельных простран-

ствах густота западин доходит до 30 штук и более на 100 га сельскохозяйственных земель. В пахотном горизонте западин цезия содержится в 6—7 раз больше, чем на соседних участках. Песчаные отложения полесий имеют древнеаллювиальное и водно-ледниковое происхождение. Радиоактивное загрязнение полесий выше, чем ополей и по площади распространения, и по уровню удельной активности (рис. 1).

В зонах радиоактивного загрязнения Брянской области на 01.01.2012 г. находилось 706 населенных пунктов с общей



Рис. 1. Полигоны и точки наблюдений

численностью населения 310 тыс. человек. Выводы ученых таковы: «Процессы освобождения и очищения почв от радионуклидов идут крайне медленно» [1, 2]. Можно считать, что в среднем населенном пункте проживает 500 человек. По литературным источникам 70 % продуктов питания жители потребляют с личных хозяйств [3]. Чтобы обеспечить жителей среднего населенного пункта продуктами питания, необходимо на приусадебных участках создать оросительную систему площадью 25 га. На такой площади не сложно осуществлять промывные поливы дождевальными техникой, разработав соответствующие технологические правила [4–6].

Процесс выщелачивания цезия из почвенных частиц можно разделить на три этапа:

1. Внутри частиц происходит перенос цезия из центра к поверхности частиц по законам молекулярной диффузии:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\pi^2 D}{4R^2} (C_{\text{ж}} - C),$$

где $C_{\text{ж}}$ — концентрация в жидкой фазе, C — концентрация цезия в твердой фазе,

D — коэффициент молекулярной диффузии, R — радиус частицы.

Очевидно, уменьшив радиус частиц, т.е. измельчив их, можно существенно увеличить градиент концентрации, а значит, скорость диффузии и снять внутридиффузионное торможение процесса.

2. Вышедший из пор почвенных частиц цезий, образует на стенках капилляров пристенный диффузный слой высокой плотности и вязкости. Перенос цезия в этом слое также подчиняется законам молекулярной диффузии:

$$q = \frac{D_{\text{ж}}}{\delta} (C_{\text{ж}} - C),$$

где q — скорость переноса вещества на единицу площади; C — концентрация на границе раздела фаз; δ — толщина диффузного слоя.

Чтобы снять внешнедиффузионное торможение и сделать эту стадию диффузии быстрой, необходимо уменьшить толщину диффузного слоя δ , что достигается созданием больших скоростей потока, турбулизацией потока и повышением температуры.

3. Процесс выщелачивания, таким образом, должен протекать в кинетической области, когда скорость процесса зависит от произведения концентраций взаимодействующих компонентов системы:

$$\frac{dC_{\text{СН}}}{dt} = \mu_1 \cdot C \cdot C_{\text{СН}},$$

где $C_{\text{СН}}$ — снятая концентрация цезия в процессе промывки; C — концентрация цезия в почве; μ_1 — скоростной коэффициент.

Признаком того, что процесс протекает в кинетической области, является зависимость скорости процесса от скорости фильтрации.

В промывной технологии должна решаться непосредственная задача, чтобы процесс протекал в кинетической области и диффузионное торможение не оказывало влияние. Это достигается увеличением скорости течения, созданием турбулентной фильтрации, утончением диффузного слоя связанной воды, применением интенсификаторов и др.

Исследования проводились в полевых условиях и в специализированных лабораториях БГАУ. Относительная погрешность измерений на радиометре 2—3 %. Максимальное значение 73 450 Бк/кг измерено с абсолютной ошибкой 983 Бк/кг, и относительной ошибкой $\pm 1,34$ %, минимальное — 625 Бк/кг соответственно 20 Бк/кг и $\pm 3,16$ %.

Влияние гидравлического режима промывки на вынос цезия изучалось на при-

боре Дарси. Общий период промывки состоял из 4—23 циклов по 4—5 суток каждый, с перерывами между циклами для высушивания почвы и определения ее удельной активности.

Нашими исследованиями установлено, что от цикла к циклу уменьшается скорость фильтрации, растет градиент напора, увеличивается плотность почвы к концу цикла, т.е. уменьшается пористость.

Промывались дерново-подзолистые почвы песчаного, супесчаного механического состава с начальной удельной активностью 2303, 11 916, 9166, 13 565, 7465 Бк/кг. Создавались разнообразные условия промывки, проверялось влияние различных химических и физических способов интенсификации вымыва, влияние замораживания почвы. Результаты промывки песчаной почвы приведены в таблице 1. В первых 6 циклах происходит замедление темпов вымыва с течением времени, но после применения интенсификаторов процесс выщелачивания снова активизируется.

Промывка в осенне-зимний и весенний периоды ведется в условиях замерзшего верхнего слоя почвы и его оттаивания по ходу промывки (табл. 2).

Перед замораживанием почва увлажнялась до наименьшей влагоемкости (ППВ).

В четырехсуточных циклах промывная норма составляет $M = 686\ 017\ \text{м}^3/\text{га}$, удельная активность снижается на 1026 Бк/кг. В суточном цикле промывная норма составляла $M = 34\ 850\ \text{м}^3/\text{га}$, удельная актив-

Таблица 1

Вымыв цезия созданием слоя воды на поверхности песчаной почвы

№ п/п	$C_{\text{ц}}$, Бк/кг	t , пром. сут	W , л	ΣW , нараст., л	ΔC , Бк/кг	Σ , вымыв %	Интенсификаторы
Начало	11 916						
1	11 283	4	202,5	202,5	633	5,30	
2	11 181	4	428,5	631,0	102	6,17	
3	11 154	3	881,3	1512,5	27	6,40	
4	10 799	4	559,9	2072,4	355	9,40	
5	10 721	4	223,6	2296,0	78	10,03	
6	10 671	4	380,5	2676,5	50	10,45	
7	10 549	4	357,7	3034,2	122	11,50	
8	10 454	4	319,0	3353,2	95	12,27	ультразвук
9	10 363	4	317,9	3671,1	91	13,03	ультразвук
10	10 162	4	292,4	3963,5	201	14,72	компрессор
11	10 027	4	275,8	4239,3	135	15,85	компрессор
12	9855	4	194,6	4433,9	172	17,30	компрессор
13	9650	4	230,9	4664,8	205	19,02	KCl
14	9443	4	215,6	4880,4	207	20,07	KCl
15	9166	4	260,9	5141,3	277	23,08	KCl
Σ		59					

ность за 4,5 суток снижается на 675 Бк/кг. При промывной норме в 4,4 раза большей вымывается в 1,5 раза больше цезия. Коэффициент фильтрации в опытах равнялся 10,9 мм/мин.

В условиях экономии воды более выгодными являются короткие циклы промывки 0,5—1 сутки. Сразу после замораживания в течение 4-х циклов снижение удельной активности цезия в зависимости от количества поданной воды подчиняется обратно пропорциональному закону, но при переходе на укороченные циклы (0,5—1 сут.) темп снижения активности сохраняется высоким при меньших затратах воды (рис. 2).

Нами выявлено, что с полусуточными циклами промывки, за 3 цикла вымылось 315 Бк/кг.

Промывка короткими поливными циклами по 9 часов оказалась наиболее экономичной. При средней промывной норме 21 544 м³/га удельная активность снижается на 1903 Бк/кг за 7 поливов. Общая эффективность вымыва 14 %.

В опытах автоматически поддерживался постоянный слой воды 5—6 см на поверхности почвы. В одном из опытов был создан большой напор воды 30 см и продолжительность цикла промывки увеличена до 23 суток, но показатели вымыва оказались сравнительно невысокими — 449 Бк/кг при больших затратах воды.

Исследование роли предварительного замачивания почвы на разные сроки (1—7 сут.) показало, что замачивание на 1—2 суток усиливает дальнейший вымыв в цикле в 1,5—2 раза. Прибегать к более

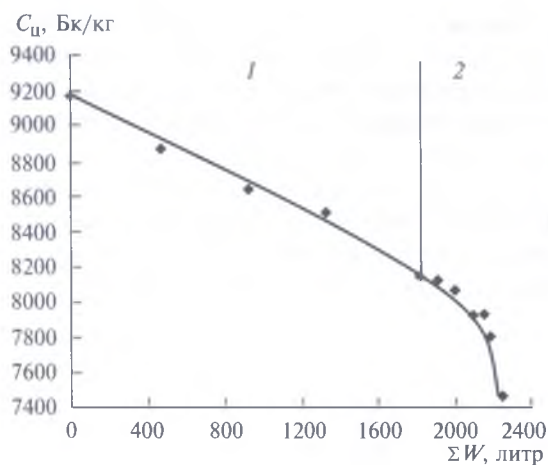


Рис. 2. Промывка цезия на приборе Дарси после замораживания:

1 — продолжительность цикла 4—5 суток; 2 — продолжительность цикла 0,5—1 суток

длительному замачиванию почвы нет необходимости.

Площади водосборов замкнутых понижений могут достигать 10 га и при слое осадков, в среднем за год 700 мм, на них будет собираться огромное количество воды, создавая озера.

При выщелачивании цезия поливами из супесчаной почвы с затоплением поверхности в зимне-весенний период промывной нормой 14 000 м³/га с предварительным замачиванием и внесением калийных удобрений можно добиться в зоне отселения 7—10 % вымыва цезия. Такого же эффекта можно достичь для супеси пылеватой в зоне отчуждения с промывной нормой 23 000 м³/га. На песчаных почвах зоны отчуждения потребуется

Таблица 2

Промывка цезия-137 на приборе Дарси после замораживания почвы

№ цикла	C _ц , Бк/кг	t, сут	Q _{ср} , см ³ /с	W, литр	ΣW, литр	Э вымыва, %
Начало	9166					
16	8870	4,0	1,358	469,3	469,3	3,2
17	8638	4,0	1,322	456,9	926,2	5,8
18	8508	4,0	1,182	408,5	1334,7	7,2
19	8140	5,0	1,135	490,3	1825,0	11,2
20	8123	1,0	1,089	94,1	1919,1	11,4
21	8069	1,0	0,980	84,7	2003,8	12,0
22	7926	1,0	1,089	94,1	2097,9	13,5
23	7919	0,5	1,247	53,7	2151,6	13,6
24	7803	0,5	0,893	38,6	2190,2	14,9
25	7465	0,5	1,204	52,0	2242,2	18,6

Примечание: в 22, 23 и 25 циклах — предварительное замачивание.

27 000 м³/га на 7–10 % вымыва. За сезон снеготаяния можно сделать до 13 поливов, продолжительностью 12 часов каждый. За разовый полив вымывается в среднем 1,3–1,8 % цезия.

Излишняя вода задерживается на водосборе блюдца кольцевыми внутриснежными лиманами, используя пленочные экраны. Недостатки воды перебрасы-

ваются с соседних водосборов собирателями в снег и соединяя блюдца каналами [7]. В случае необходимости можно увеличить скорость фильтрации воды, рыхля «пятна» по частям. Регулярно необходимо брать пробы почвы и определять удельную радиоактивность. Излишнюю воду можно использовать для увлажнительных и вегетационных поливов, предварительно на-

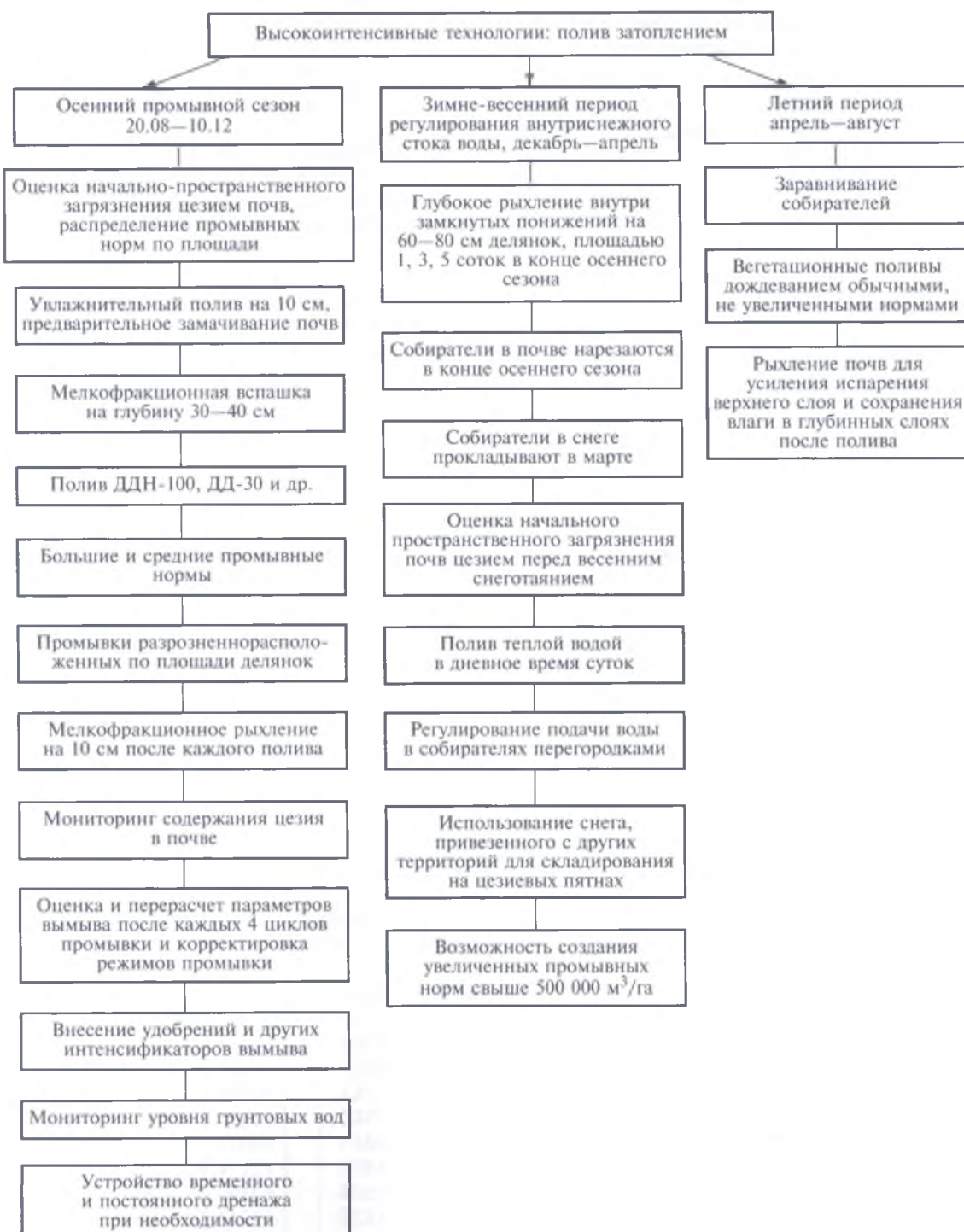


Рис. 3. Схема высокоинтенсивной технологии промывки

копив ее в водоемах, созданных в замкнутых понижениях или каналах. Целесообразно создавать вытесняющий режим полива нормами, равными 1,25 вегетационных норм.

При промывке почв на небольших площадях в осенний период лучше использовать передвижные насосные станции, разборный трубопровод, высококомобильные ДУ с большой интенсивностью дождя, позволяющие поливать поля любой конфигурации, например, ДДН-70, ДДН-100, дождевальные аппараты ДД-30 [8, 9].

Экспериментальные данные по определению скорости фильтрации, полученные на супесчаной почве во время промывок, свидетельствуют, что интенсивность дождя ДДН-100 не превышает скорость фильтрации даже после 15 циклов (мы рекомендовали 13 циклов). На песчаной почве положение еще лучше. Интенсивность дождя, создаваемого аппаратом ДД-30, вообще не вызывает опасений. Тем не менее необходимо постоянно контролировать образование поверхностного стока, прекращать полив и проводить глубокое рыхление при необходимости. В районах Брянской области, подвергшихся наиболее сильному радиоактивному загрязнению, преобладают дерново-подзолистые супесчаные и песчаные почвы. По данным Белоуса Н. М. и Шаповалова В. Ф. доза внутреннего облучения населения на этих почвах составляет 60–80 % от общей дозы облучения. На суглинистых дерново-подзолистых почвах 10–15 % [10].

После каждого цикла промывки, спустя двое суток для подсыхания почвы необходимо проводить мелкофракционное (до 1–2 мм) рыхление на глубину 10–20 см, где сосредоточено наибольшее количество цезия. Рыхление резко усиливает вынос цезия с испаряющейся водой. Но эффект рыхления проявляется и в сбе-

режении глубинных слоев влаги, и в экономии промывной воды.

Подъем грунтовых вод при промывках дождеванием ДДН-100 будет происходить под делянкой 1,44 га и 0,72 га при поливе ДД-30. Продолжительность такого подъема 12 часов. До следующего полива этой же делянки проходит 8 суток, в течение которых будет происходить боковой отток грунтовых вод.

Для усиления бокового стока грунтовых вод целесообразно поливать разрозненно-расположенные по площади делянки.

В таких условиях основным дренажом должен быть временный дренаж.

Разрозненное расположение замкнутых понижений на территории создано самой природой. Схема технологии приведена на рисунке 3.

Заключение

Промывные поливы затоплением по предлагаемой технологии обеспечивают извлечение цезия из почвы за разовый полив в среднем на 1,3–1,8 % цезия, при дождевании 1,8–2,1 %. Осуществляя за сезон снеготаяния до 13 поливов, можно за период до 10 лет снизить дозу внешнего и внутреннего облучения людей на радиоактивно-загрязненных территориях до предусмотренной законом величины 1 мЗ/год и оздоровить среду обитания населения. Проводя промывные поливы весной и в осенний сезон, срок очистки почвы существенно сокращается.

Экономический эффект от применения предлагаемой технологии складывается из следующего: оросительные системы, созданные для промывных поливов, используются в вегетационный период на поливе огородных культур, повышая их урожайность; предотвращенный ущерб за счет снижения дозы облучения, оценивается, как известно, в 20 тыс. евро на 1 чел-Зв/год.

Библиографический список

1. Белоус Н. М., Бельченко С. А., Дубенок Н. М. и др. Современные проблемы радиологии в сельскохозяйственном производстве: монография. — Рязань: Мещерский филиал ГНУ ВНИИГиМ Россельхоз академии. — 2010. — 363 с.
2. Белоус Н. М. Социально-экономическое развитие районов Брянской области, пострадавшей от Чернобыльской катастрофы // Вестник Брянской ГСХА. — 2013. — № 4. — С. 41–48.
3. Торики В. Е. О роли личных подсобных хозяйств в обеспечении населения продовольствием / В. Е. Торики, Е. Н. Кислова, Н. А. Кислов, А. А. Бондаренко // Вестник Брянской ГСХА. — Брянск: Изд-во Брянской ГСХА. — 2007. — № 6. — С. 19–24.

4. Василенков С. В. Водохозяйственные реабилитационные мероприятия на радиоактивнозагрязненных территориях: монография / С. В. Василенков — М.: Изд. МГУП. — 2010. — 289 с.
5. Василенков В. Ф., Василенков С. В., Козлов Д. В. Водохозяйственная радиология: учебное пособие. — М.: Изд. МГУП. — 2009. — 413 с.
6. Василенков С. В., Демина О. Н. Вымыв цезия-137 из почвы в населенных пунктах радиоактивно-загрязненной местности // Экология урбанизированных территорий. — 2009. — № 4. — С. 59—64.
7. Василенков С. В. Промывка цезиевых пятен способом задержания внутриснежного стока // Проблемы энергетики, природопользования, экологии. Сб. Материалов научно-практической конференции. — Брянск: Изд. Брянская ГСХА. — 2007. — С. 101—106.
8. Василенков В. Ф., Василенков С. В. Удаление радиации в загрязненных цезием населенных пунктах // Проблемы энергообеспечения, информации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК. Сб. материалов международной научно-практической конференции. — Брянск: Изд. Брянской ГСХА. — 2014. — С. 66—77.
9. Василенков С. В., Демина О. Н. Рекомендации по уменьшению удельной активности почв на территориях, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС // Научно-технический журнал: Вестник МАН «Экология и безопасность жизнедеятельности». — Санкт-Петербург. 2012. — Том 17. — № 3. — С. 79—82.
10. Белоус Н. М., Шаповалов В. Ф. Продуктивность пашни и реабилитация песчаных почв: монография. — Брянск: Изд. Брянской ГСХА. — 2006. — 431 с.

HIGH-INTENSITY TECHNOLOGY OF SOIL CLEANING IN THE SETTLEMENTS ON THE TERRITORIES CONTAMINATED BY CESIUM

S. V. Vasilenkov, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of FGBOU VO Bryansk State Agricultural University, poivp@bgsha.com,

N. M. Belous, D. of Agricultural Sci., Professor of FGBOU VO Bryansk State Agricultural University, poivp@bgsha.com,

V. F. Vasilenkov, D. of Tech. Sci., Professor of FGBOU VO Bryansk State Agricultural University, poivp@bgsha.com,

O. N. Demina, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of FGBOU VO Bryansk State Agricultural University, ol20nik@yandex.ru

References

1. Belous N. M., Belchenko S. A., Dubenok N. M. etc. Modern problems of radiology in agricultural economic production: monograph. — Ryazan: Meshcherian branch GNU VNIIGiM Institute Rosselhoz Academy. — 2010. — 363 p.
2. Belous N. M. Socio-economic development of the areas of the Bryansk region affected by the Chernobyl disaster // Bulletin of Bryansk State Agricultural Academy. — 2013. — № 4. — P. 41—48.
3. Torikov V. E., Kislova E. N., Kislov N. A., Bondarenko A. A. About the role of private farms in the provision of food // Bulletin of Bryansk State Agricultural Academy. — 2007. — № 6. — P. 19—24.
4. Vasilenkov S. V. Water rehabilitation activities in the contaminated territories: monograph. — M.: edit. MGYP. — 2010. — 289 p.
5. Vasilenkov V. F., Vasilenkov S. V., Kozlov D. V. Water: tutorial book/ S. V. Vasilenkov. — M.: edit. MGYP. — 2009. — 413 p.
6. Vasilenko S. V., Demina O. N. Cesium-137 washing from the soil in the settlements radioactivity contaminated areas // Ecology of Urban Areas. — 2009. — № 4. — P. 59—64.
7. Vasilenko, S. V. Flushing cesium spots manner detention of runoff // Problems of energy, natural resources, ecology. Proceedings of the conference. — Bryansk: Bryansk State Agricultural Academy. — 2007. — P. 101—106.
8. Vasilenkov V. F., Vasilenkov S. V. Removal of radiation contaminated with cesium settlements. / V. F. Vasilenkov // Problems of energy, information and automation, safety and environmental management in agriculture. International scientific-practical conference. — Bryansk State Agricultural Academy. — 2014. — P. 66—77.
9. Vasilenkov S. V., Demina O. N. Recommendations to reduce the specific activity of the soils in the areas affected by the Chernobyl the NPS // Scientific and Technical Journal «Ecology and life safety». — Sankt Petersburg, 2012. — Volume 17. — № 3. — P. 79—82.
10. Belous N. M., Shapovalov V. F. Productivity of arable land and rehabilitation of sandy soil: monograph. — Bryansk: edit. Bryansk State Agricultural Academy. — 2006. — 431 p.