

Персистентность некоторых фосфорорганических соединений в почвах различных типов

© 2014. П.В. Наумов, аспирант Л. Ф. Щербакова, к.х.н., доцент,
Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина,
e-mail: shchlf@yandex.ru

Изучена устойчивость токсичных О-изобутилметилфосфоната (I) и О,О'-диизобутилметилфосфоната (II) в естественных почвах, характерных для районов уничтожения химического оружия, пос. Марадьковский Кировской области, пос. Леонидовка Пензенской области и г. Почеп Брянской области. Эксперимент проводили при температурах 7 и 17°C. Деструкция фосфорорганических соединений (ФОС) протекала при различных значениях влажности: в воздушно-сухой почве и при влажности 30, 50 и 70%. Анализ образцов на остаточное содержание исследуемых ФОС проводили газохроматографическим методом. Установлено, что гидролиз рассматриваемых соединений происходит медленно: периоды полураспада при 17°C находятся в интервалах 2045–3300 и 816–1306 ч. Кинетические параметры реакций разложения в значительной степени зависят от содержания гумуса и гранулометрического состава почвы. Так, при 7°C константы скорости реакции гидролиза (I) и (II) в дерновой почве увеличиваются в 1,25 и 1,3 раза по сравнению с подзолистой. Происходит это в результате роста значений фактора Аррениуса. При увеличении влажности до 30, 50 и 70%, по сравнению с воздушно-сухими образцами, τ_{50} (I) уменьшаются на 6–11, 13–18 и 18–26% соответственно. Для (II) эти значения колеблются в более широком диапазоне и в среднем составляют 12, 16 и 24% соответственно.

По константе скорости для (I) и (II) построены селективные ряды изучаемых почв. Наиболее активно ФОС разлагаются в дерновой и серой лесной почвах, наименее – в дерново-подзолистых и подзолистых. Выявленные закономерности могут быть использованы при экологическом мониторинге и ремедиации почв указанных объектов.

The persistence and kinetics of decomposition toxic O-isobutyl-methylphosphonate (I) and O,O'-diisobutyl-methylphosphonate (II) is studied in the soil areas of chemical weapons decommission plant in the settlement Maradykovskiy in the Kirov region, in the settlement Leonidovka, in the Penza region and in the town of Pochep, the Bryansk region. The experiment was conducted at 7°C and 17°C. Destruction of organophosphorus compounds was performed at the different degrees of humidity: dry soil, as well as 30%, 50% and 70% humidity. Analysis of the samples for the organophosphorus compounds contents was made with the use of gas chromatography method. Kinetic parameters of the decomposition reactions largely depend on the content of humus and granulometric composition of soil. In particular, at 7°C the reaction rate constant of hydrolysis (I) and (II) in the sod-podzol soil is increased by 1.25-1.3 as compared with podzol. It happens due to increasing the values of Arrhenius Factor. With humidity increase to 30, 50 and 70%, as compared with dry soil, τ_{50} (I) decreases by 6-11, 13-18 and 18-26% accordingly. For (II) these values vary in the bigger range and equal to 12, 16 and 24% accordingly.

The most actively the studied compounds decompose the turf and grey forest soil, the least actively – in sod-podzol and podzol soil. The revealed regularities can be used for environmental monitoring and remediation of soils of the specified objects.

Ключевые слова: почва, гумус, миграция, сорбция, фосфорорганические соединения, уничтожение химического оружия.

Keywords: soil, humus, migration, sorption, organophosphorus compounds, destroy chemical weapons.

По окончании уничтожения химического оружия (УХО) задействованные территории должны быть восстановлены. В настоящее время ведутся работы по изучению исходных данных и планированию мероприятий по восстановлению естественных природных сред районов УХО.

Для объектов, производящих ликвидацию фосфорорганических токсичных химикатов (ФТХ), необходимо располагать полной информацией о свойствах образующихся продуктов детоксикации. Токсичность и миграционная

способность фосфорорганических соединений (ФОС) – продуктов промышленной деструкции ФТХ рассмотрена в работах [1–4], дана оценка устойчивости почв к техногенному загрязнению в районе УХО [5], а информация о стойкости и особенностях разложения указанных соединений в природных средах недостаточна. Поэтому целью работы явилось изучение персистентности и кинетики разложения ФОС в почвах различных типов из районов УХО.

Известно, что основными продуктами деструкции ФТХ О-изо-S-2-(N,N-диэтиламино)

этилтиолового эфира метилфосфоновой кислоты являются О-изобутилметилфосфонат (I) и О,О'-диизобутилметилфосфонат (II) [6]. Объектом наших исследований являются реальные природные почвы районов УХО пос. Марадыковский Кировской области, пос. Леонидовка Пензенской области и г. Почеп Брянской области.

Образцы почв отобраны в районе объекта УХО пос. Марадыковский: дерновая, супесь – берег р. Вятки; подзолистая, супесь – поляна вблизи вахтового городка; дерново-подзолистая, суглинистая – берег пруда на р. Погиблица.

Образцы почв отобраны в районе объекта УХО пос. Леонидовка: серая лесная щепнистая, супесь – берег Сурского водохранилища, серая лесная, супесь – берег оз. Мохового.

Образцы почв отобраны в районе объекта УХО г. Почеп: серая лесная, суглинок – берег р. Рожок, дерново-подзолистая, суглинок – километр от южной окраины г. Почеп.

Отбор почвенных образцов, подготовку почв к анализам проводили в соответствии с ГОСТами, анализы выполняли по общепринятым методикам [7–9]. В исследуемых почвах изучалась устойчивость и кинетика реакций разложения (I) и (II). Образцы почв просеивали через сито с ячейками 0,5 мм, оставляя мелкую фракцию, и выдерживали при 105°C в течение 1 часа в сушильном шкафу. Эксперимент проводили при температурах 7 и 17°C. Деструкция ФОС протекала при различных значениях влажности: в воздушно-сухой почве и при влажности 30, 50 и 70%. Такие параметры были выбраны на основании результатов исследований [10]. Необходимая влажность достигалась добавлением соответствующего количества дистиллированной воды. В предварительно взвешенный образец почвы вносили расчётное количество (I) или (II) для создания содержания $2,5 \times 10^{-5}$ и $1,8 \times 10^{-5}$ моль/кг соответственно, тщательно перемешивали и отбирали через определённые промежутки времени. Для исключения потери влаги образцы почв помещали в герметичные эксикаторы. Анализ образцов на остаточное содержание исследуемых ФОС проводили газохроматографическим методом по методикам [11, 12].

По кинетическим кривым определяли периоды полуразложения τ_{50} исследуемых ФОС в каждом типе почв и при конкретных условиях, рассчитывали константу скорости реакции k , энергию активации E_a и фактор Аррениуса A . Расчёт производили аналогично работе [13].

Опытные и расчётные данные эксперимента разложения (I) и (II) в почвах района пос. Марадыковский представлены в таблицах 1 и 2, в почвах района пос. Леонидовка в таблицах 3 и 4, в почвах района г. Почеп в таблицах 5 и 6.

Данные, приведённые в таблицах, указывают на высокий уровень персистентности исследуемых соединений в почве в природных условиях. Особенно это относится к (I). Физико-химические свойства почв различных типов в разной степени влияют на кинетические параметры деструкции. Отмечено, что в большей степени величина периода полуразложения зависит от содержания гумуса в почве и её гранулометрического состава.

Выявлена стабильная обратная зависимость τ_{50} от насыщенности грунта органическим веществом. Например, в отношении (I) для дерновой почвы из района пос. Марадыковский (табл. 1) и обеих разновидностей серых лесных почв района пос. Леонидовка (табл. 3) периоды полуразложения близки по значению: при 17°C и влажности образцов 30% они отличаются друг от друга на 2–6%. Объясняется это сходным уровнем гумусированности этих образцов почв. К тому же, если рассмотреть несколько типов почв с постепенным увеличением доли органической составляющей, можно выявить закономерность: скорость детоксикации также возрастает. На наш взгляд, удобнее всего исследовать данное явление на почвах района пос. Марадыковский. Так, τ_{50} (II) в воздушно-сухих образцах при 7°C последовательно возрастает от 2364 через 2616 до 2820 час. для дерновых, дерново-подзолистых и подзолистых почв соответственно (табл. 2).

Кроме того, значительно влияет на гидролиз (I) и (II) гранулометрический состав почв. Установлено, что в почве с высокой долей мелких частиц (тяжёлый механический состав) разложение ФОС замедлено. Так, например, в почвах районов пос. Леонидовка и г. Почеп, относящихся к одному классу серые лесные, и незначительно отличающихся по содержанию гумуса [14], τ_{50} заметно отличается. Для лёгких суглинков из района УХО г. Почеп при температуре 7°C и влажности 30% значение τ_{50} для (I) составляет 5016 час. (табл. 5), тогда как в супеси из района пос. Леонидовка данный параметр снижается до 4764–4890 час. при неизменности прочих параметров (табл. 3). Для супесчаных почв – дерновых из района пос. Марадыковский и серых лесных из района пос. Леонидовка – наблюдается примерное равенство значений τ_{50} (табл. 1 и 3 соответственно).

Таблица 1
Кинетические характеристики гидролиза О-изобутилметилфосфоната в почвах района пос. Марадьковский (P=0,95, n=5)

Параметры	Типы почв											
	Дерновая, супесь				Подзолистая, супесь				Дерново-подзолистая, суглинок			
	воздушно-сухая	30	50	70	воздушно-сухая	30	50	70	воздушно-сухая	30	50	70
Влажность, %	49,7±2,5	48,3±2,4	48,7±2,4	47,8±2,4	48,2±2,4	47,4±2,4	47,1±2,4	48,9±2,5	46,7±2,3	47,6±2,4	47,1±2,4	46,7±2,3
$E_a \cdot 10^{-3}$, Дж/моль	2,56±0,13	1,53±0,08	1,97±0,1	1,39±0,07	1,03±0,05	0,82±0,04	0,75±0,04	1,72±0,09	0,61±0,02	0,95±0,05	0,83±0,04	0,73±0,04
t , °C	7±0,2											
$k \cdot 10^6$, ч ⁻¹	138±7	149±7	158±8	167±8	103±5	114±6	121±6	128±6	114±6	126±6	135±7	142±7
τ_{50} , ч	5016±251	4638±232	4392±220	4152±208	6744±337	6060±303	5720±286	5400±270	6060±303	5520±276	5144±257	4890±245
t , °C	17±0,2											
$k \cdot 10^6$, ч ⁻¹	288±14	306±15	325±16	339±17	210±11	231±12	244±12	265±13	229±11	254±13	271±14	283±14
τ_{50} , ч	2403±120	2268±113	2133±107	2045±102	3300±165	3000±150	2846±142	2616±131	3031±152	2728±136	2560±128	2448±122

Примечание: E_a – энергия активации, A – фактор Аррениуса, t – температура, k – константа скорости реакции, τ_{50} – период полураспада исследуемых соединений.

Таблица 2
Кинетические характеристики гидролиза О,О'-дизобутилметилфосфоната в почвах района пос. Марадьковский (P=0,95, n=5)

Параметры	Типы почв											
	Дерновая, супесь				Подзолистая, супесь				Дерново-подзолистая, суглинок			
	воздушно-сухая	30	50	70	воздушно-сухая	30	50	70	воздушно-сухая	30	50	70
Влажность, %	53,7±2,7	56,1±2,8	55,2±2,8	54,3±2,7	51,9±2,6	53,0±2,7	53,6±2,7	52,3±2,6	53,0±2,7	54,7±2,7	53,9±2,7	53,5±2,7
$E_a \cdot 10^{-3}$, Дж/моль	31,5±1,6	96,1±4,8	69,5±3,5	51,3±2,6	12,2±0,6	21,0±1,1	27,4±1,4	16,2±0,8	21,0±1,1	44,6±2,2	33,8±1,7	29,3±1,5
t , °C	7±0,2											
$k \cdot 10^6$, ч ⁻¹	293±15	331±17	352±18	380±19	246±12	265±13	272±14	283±14	265±13	279±14	295±15	304±15
τ_{50} , ч	2364±118	2093±105	1968±98	1824±91	2820±141	2616±131	2549±127	2448±122	2616±131	2482±124	2347±117	2280±114
t , °C	17±0,2											
$k \cdot 10^6$, ч ⁻¹	650±33	760±38	798±40	849±42	531±27	581±29	602±30	614±31	581±29	628±31	656±33	672±34
τ_{50} , ч	1066±53	912±46	869±43	816±41	1306±65	1192±60	1152±58	1128±56	1192±60	1104±55	1056±53	1032±52

Примечание: E_a – энергия активации, A – фактор Аррениуса, t – температура, k – константа скорости реакции, τ_{50} – период полураспада исследуемых соединений.

Таблица 3

Кинетические характеристики гидролиза О-изобутилметилфосфоната в почвах района пос. Леонидовка (P=0,95, n=5)

Параметры	Типы почв										
	Серая лесная щебнистая, супесь					Серая лесная, супесь					
	30	50	70	воздушно-сухая	30	50	70	воздушно-сухая	30	50	70
Влажность, %	48,6±2,4	47,7±2,4	47,5±2,4	47,9±2,4	48,8±2,4	47,7±2,4	47,5±2,4	47,9±2,4	48,1±2,4	47,8±2,4	47,0±2,4
$E_a \cdot 10^3$, Дж/моль	1,57±0,08	1,25±0,06	1,23±0,06	1,15±0,06	1,83±0,09	1,25±0,06	1,23±0,06	1,15±0,06	1,35±0,07	1,26±0,06	0,97±0,05
$A \cdot 10^{-5}$, ч ⁻¹											
t, °C							7±0,2				
$k \cdot 10^6$, ч ⁻¹	135±7	145±7	157±8	131±7	145±7	157±8	164±8	131±7	142±7	154±8	162±8
τ_{50} , ч	5144±257	4764±238	4416±221	5272±264	4764±238	4416±221	4224±211	5272±264	4890±245	4512±226	4272±214
t, °C							17±0,2				
$k \cdot 10^6$, ч ⁻¹	277±14	300±15	318±16	267±13	300±15	318±16	332±17	267±13	289±14	312±16	326±16
τ_{50} , ч	2504±125	2313±116	2178±109	2592±130	2313±116	2178±109	2088±104	2592±130	2397±120	2223±111	2128±106

Примечание: E_a – энергия активации, A – фактор Аррениуса, t – температура, k – константа скорости реакции, τ_{50} – период полураспада исследуемых соединений.

Таблица 4

Кинетические характеристики гидролиза О,О'-диизобутилметилфосфоната в почвах района пос. Леонидовка (P=0,95, n=5)

Параметры	Типы почв										
	Серая лесная щебнистая, супесь					Серая лесная, супесь					
	30	50	70	воздушно-сухая	30	50	70	воздушно-сухая	30	50	70
Влажность, %	55,6±2,8	54,0±2,7	53,7±2,7	54,8±2,7	54,1±2,7	54,0±2,7	53,7±2,7	54,8±2,7	55,3±2,8	55,1±2,8	54,0±2,7
$E_a \cdot 10^3$, Дж/моль	67,4±3,4	41,0±2,1	40,8±2,0	48,2±2,4	41,0±2,1	40,8±2,0	37,1±1,9	48,2±2,4	63,1±3,2	62,2±3,1	40,8±2,0
$A \cdot 10^{-5}$, ч ⁻¹											
t, °C							7±0,2				
$k \cdot 10^6$, ч ⁻¹	283±14	322±16	341±17	279±14	322±16	341±17	352±18	279±14	304±15	326±16	341±17
τ_{50} , ч	2448±122	2155±108	2030±102	2482±124	2155±108	2030±102	1968±98	2482±124	2280±114	2124±106	2030±102
t, °C							17±0,2				
$k \cdot 10^6$, ч ⁻¹	645±32	718±36	760±38	630±31	718±36	760±38	781±39	630±31	690±34	738±37	760±38
τ_{50} , ч	1074±54	966±48	912±46	1101±55	966±48	912±46	888±44	1101±55	1005±50	939±47	912±46

Примечание: E_a – энергия активации, A – фактор Аррениуса, t – температура, k – константа скорости реакции, τ_{50} – период полураспада исследуемых соединений.

Таблица 5
Кинетические характеристики гидролиза О-изобутилметилфосфоната в почвах района г. Почеп (P=0,95, n=5)

Параметры	Типы почв							
	Серая лесная, суглинок			Дерново-подзолистая, суглинок				
Влажность, %	воздушно-сухая	30	50	70	воздушно-сухая	30	50	70
$E_a \cdot 10^3$, Дж/моль	47,1±2,4	48,4±2,4	48,3±2,4	48,0±2,4	47,4±2,4	48,6±2,4	47,3±2,4	47,9±2,4
$A \cdot 10^{-5}$, ч ⁻¹	0,78±0,04	1,50±0,07	1,53±0,08	1,43±0,07	0,77±0,04	1,42±0,07	0,88±0,04	1,16±0,06
t, °C	7±0,2							
$k \cdot 10^6$, ч ⁻¹	128±6	138±7	149±7	157±8	111±6	121±6	131±7	136±7
τ_{50} , ч	5400±270	5016±251	4638±232	4416±221	6240±312	5720±286	5272±264	5112±256
t, °C	17±0,2							
$k \cdot 10^6$, ч ⁻¹	258±13	283±14	306±15	320±16	224±11	249±12	265±13	276±14
τ_{50} , ч	2688±134	2448±122	2268±113	2168±108	3093±155	2784±139	2616±131	2515±126

Примечание: E_a – энергия активации, A – фактор Аррениуса, t – температура, k – константа скорости реакции, τ_{50} – период полураспада исследуемых соединений.

Таблица 6
Кинетические характеристики гидролиза О,О'-диизобутилметилфосфоната в почвах района г. Почеп (P=0,95, n=5)

Параметры	Типы почв							
	Серая лесная, суглинок			Дерново-подзолистая, суглинок				
Влажность, %	воздушно-сухая	30	50	70	воздушно-сухая	30	50	70
$E_a \cdot 10^3$, Дж/моль	55,0±2,8	55,3±2,8	55,1±2,8	54,4±2,7	53,3±2,7	54,6±2,7	53,7±2,7	54,0±2,7
$A \cdot 10^{-5}$, ч ⁻¹	50,4±2,5	61,4±3,1	57,9±2,9	43,9±2,2	23,1±1,2	41,8±2,1	30,5±1,5	35,0±1,7
t, °C	7±0,2							
$k \cdot 10^6$, ч ⁻¹	272±14	287±14	304±15	315±16	257±13	274±14	287±14	297±15
τ_{50} , ч	2549±127	2414±121	2280±114	2202±110	2698±135	2532±127	2414±121	2336±117
t, °C	17±0,2							
$k \cdot 10^6$, ч ⁻¹	614±31	652±33	688±34	704±35	566±28	614±31	636±32	660±33
τ_{50} , ч	1128±56	1063±53	1008±50	984±49	1224±61	1128±56	1089±54	1050±53

Примечание: E_a – энергия активации, A – фактор Аррениуса, t – температура, k – константа скорости реакции, τ_{50} – период полураспада исследуемых соединений.

Содержание гумуса максимально в дерновых почвах (3,2%), в серых лесных 2,8–3,0%, в дерново-подзолистых снижается до 1,2–1,4%, наименее гумусированы подзолистые почвы [14]. Аналогичный ряд просматривается в изменении кинетических параметров деструкции рассматриваемых ФОС. Так, при 7°C константы скорости реакции гидролиза (I) и (II) в дерновой почве увеличиваются в 1,25–1,3 раза по сравнению с подзолистой (табл. 1, 2). Происходит это в результате роста значений фактора Аррениуса.

При увеличении влажности константы скорости разложения (I) и (II) по сравнению с воздушно-сухими образцами, при одинаковых прочих условиях, растут в 1,1–1,3 раза.

Кривая гидролиза (II) в дерновой почве района пос. Марадьковский Кировской области при 7°C представлена на рисунке.

Из рисунка видно, что всё разложение происходит в два этапа. Причём на первом этапе скорость гидролиза значительно выше. Моменту изменения скорости разложения на графике соответствует точка перегиба кривой. По внешнему виду зависимости схожи с экспонентой с отрицательным показателем.

Таким образом, впервые изучена кинетика разложения (I) и (II) в реальных почвах районов УХО. Нами установлено, что гидролиз рассматриваемых соединений происходит

медленно: при 17°C он протекает в интервалах 2045–3300 и 816–1306 час. Причём кинетические параметры реакций разложения в значительной степени зависят от свойств почвы, в первую очередь – от содержания гумуса и гранулометрического состава. Так, по константе скорости для (I) и (II) можно построить следующие селективные ряды:

дерновая супесчаная (Марадьковский) → серая лесная щебнистая (Леонидовка) → серая лесная супесчаная (Леонидовка) → серая лесная суглинистая (Почеп) → дерново-подзолистая суглинистая (Марадьковский) → дерново-подзолистая суглинистая (Почеп) → подзолистая супесчаная (Марадьковский).

Очевидно, что (I) и (II) наиболее активно разлагаются в дерновой и серой лесной почвах, наименее – в дерново-подзолистых и подзолистых.

Выявленные закономерности могут быть использованы при экологическом мониторинге и ремедиации объектов УХО.

Литература

1. Огородникова С.Ю., Головки Т.К. Влияние метилфосфоновой кислоты на растения пелюшки // Агрехимия. 2005. № 4. С. 37–41.
2. Огородникова С.Ю., Головки Т.К. Реакции растений ячменя на действие ксенобиотика – метилфосфо-

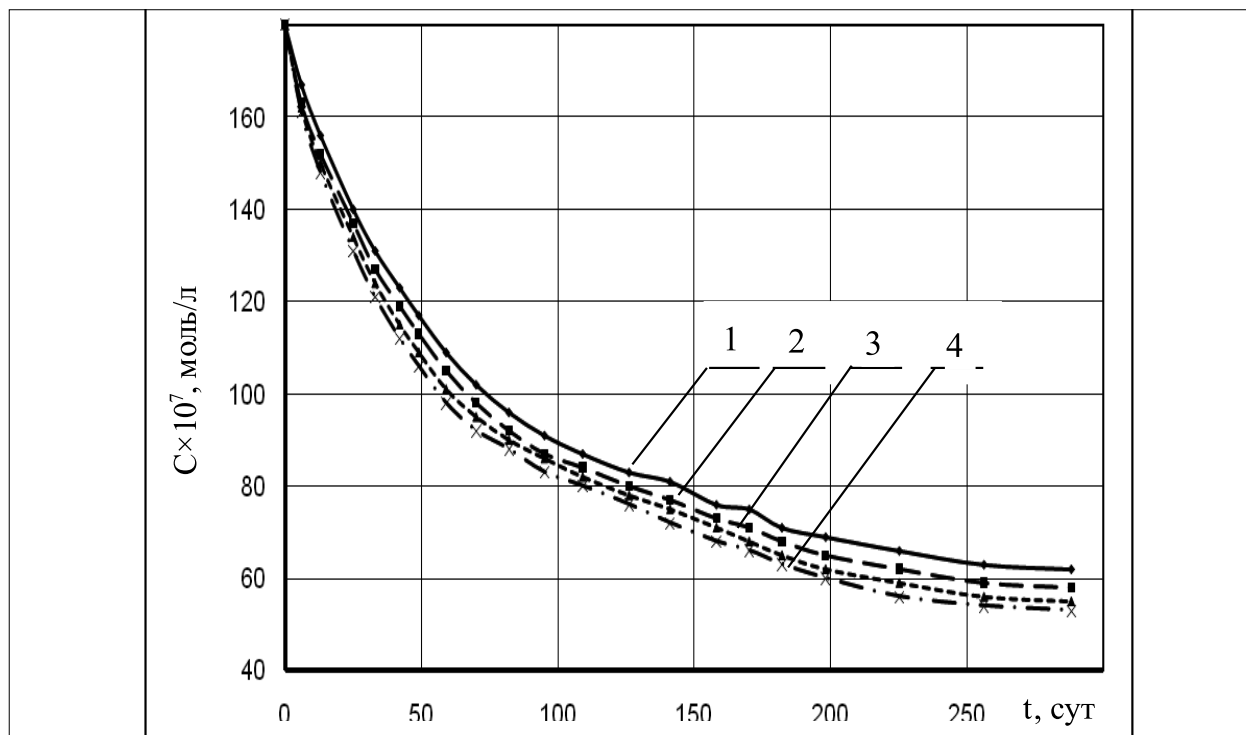


Рис. Кинетическая кривая гидролиза О,О'-диизобутилметил-фосфоната в дерновой почве района пос. Марадьковский при 7°C. 1 – воздушно-сухая; 2 – при влажности 30%; 3 – при влажности 50%; 4 – при влажности 70%.

новой кислоты в низких концентрациях // Сибирский экологический журнал. 2006. Т. 13. № 3. С. 371–375.

3. Щербакова Л.Ф., Наумов П.В., Скоробогатова В.И., Серебренников Б.В., Скоробогатов А.Г., Власов И.А., Сотников Н.В., Мандыч В.Г., Гелясов В.В., Попов А.А., Белокопытов Р.О. Изучение закономерностей миграции фосфорорганических химикатов в полевых условиях на почвах объекта по хранению и уничтожению химического оружия п. Леонидовка Пензенской области // Доклады академии военных наук, Поволжское отделение. 2009. Вып. № 4 (39). С. 57–63.

4. Малочкина Е.И., Уткин А.Ю. Установление класса токсичности и степени опасности промышленных отходов для битумно-солевых масс, полученных при уничтожении вязкого зомана // Федеральные и региональные проблемы уничтожения химического оружия. М.: ВИНТИ, 2003. Вып. 4. С. 123–128.

5. Олькова А.С., Дабах Е.В. Оценка устойчивости почв и прогноз их состояния в районе уничтожения химического оружия // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 1. С. 73–76.

6. Демедюк В.В., Шалганова И.В., Широков А.Ю. Эколого-гигиеническая характеристика российской двухстадийной технологии химической детоксикации зарина, зомана, Ви-газов. М.-СПб. 1998. С. 23.

7. ГОСТ 17.4.4.02-84 «Охрана природы. Почва. Методы отбора и подготовки проб почвы для химического, бактериологического и гельминтологического анализа».

8. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв / Под ред. Е. В. Шеина. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 200с.

9. Роуэлл Д.Л. Почвоведение: методы и использование. М.: Колос, 1998. 486 с.

10. Мандыч В.Г., Щербаков А.А., Щербакова Л.Ф., Скоробогатова В.И., Серебренников Б.В., Скоробогатов А.Г., Сотников Н.В., Кобцов С.Н., Мандыч А.В., Наумов П.В., Ферезанова М.В., Гелясов В.В. Исследование физических характеристик почв на объекте по уничтожению химического оружия п. Марадьковский Кировской области // Доклады академии военных наук. Поволжское отделение. 2008. Вып. № 4 (33). С. 156–165.

11. МВИ № 031-03-248-07. Растегаев О.Ю., Федоренко Е.В., Заварзин В.А., Симоненко Н.С., Чупис В.Н., Черников С.Н. Методика выполнения измерений содержания О-изобутилметилфосфоната в почвах газохроматографическим методом с пламенно-фотометрическим детектированием. Саратов: ФГУ «ГосНИИЭНП», 2007. 25 с.

12. МВИ № 031-03-172-05. Станьков И.Н., Сергеева А.А., Деревягина И.Д., Морозова О.Т. Методика выполнения измерений содержания диизобутилового эфира метилфосфоновой кислоты в почвах газохроматографическим методом с термоионным детектированием. М: ФГУП «ГосНИИОХТ», 2005. 17 с.

13. Щербаков А.А., Скоробогатова В.И., Щербакова Л.Ф., Мандыч В.Г. Трансформация фосфорорганических соединений в объектах окружающей среды. Монография. Саратов: СВИ БХБ, 2008. 174 с.

14. Щербакова Л.Ф., Наумов П.В., Околелова А.А. К вопросу о ремедиации почв территорий размещения объектов уничтожения химического оружия // Фундаментальные исследования. 2011. № 11 (2). С. 424–429.