



научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



<http://petrsu.ru>

Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 4 (58). Декабрь, 2025

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugolek
В. Н. Якимов
А. В. Сони́на

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>



© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»



УДК 631.416.8:631.86:502.05(470.62)

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ РТУТИ И МЫШЬЯКА В СИСТЕМЕ «ПОЧВА – РАСТЕНИЕ» В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

КОРОЛЁВ
Александр Николаевич

кандидат биологических наук, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 644080, Омская область, г. Омск, проспект Мира, д. 5, korolev66.66@mail.ru

Ключевые слова:

ртуть
мышьяк
лугово-черноземная почва
жидкое органическое удобрение
свиной навоз
пшеница яровая

Аннотация: : Неграмотное использование в качестве удобрений жидких отходов животноводства может приводить к увеличению содержания в почве подвижных форм тяжелых металлов и металлоидов. Цель исследования – рассмотрение особенностей поведения Hg и As в системе «почва – растение» и эколого-агрохимическая оценка применения жидкой фракции свиного бесподстилочного навоза в качестве органического удобрения. В полевом опыте в подзоне южной лесостепи Омской области на лугово-черноземной почве исследовано действие и последствие (в течение двух лет) органического удобрения на урожайность сорта яровой мягкой пшеницы Памяти Азиева и поведение ртути и мышьяка в системе «почва – растение». Предшественником яровой пшеницы являлся горох. Установлено, что оптимальная доза жидкой фракции свиного навоза на лугово-черноземной почве под яровую пшеницу – 200 т/га. Как при действии, так и при последствии в этом варианте была получена наивысшая прибавка урожайности. Однако внесение свиного бесподстилочного навоза ведет к увеличению содержания в почве Hg и As как в год действия, так и в ближайшие годы последствия. Внесение удобрения в дозе 300 т/га в год действия приводит к увеличению валового содержания ртути в 1.36 раза, мышьяка – 1.1 раза. Это сопровождается увеличением содержания данных элементов во всех органах пшеницы (корень, солома, зерно) в период вегетации и сбора урожая. Распределение элементов по органам пшеницы как на контрольной, так и на почве с использованием удобрения следующее: корни > солома > зерно. Корни являются защитным барьером, препятствующим поступлению и накоплению металлов в генеративных органах. Вынос элементов с зерном в год действия и два ближайших года последствия не превышает 0.01 % от валового содержания их в почве и 15 % от количества, поступившего с органическим удобрением. Предлагается проводить расчет коэффициента накопления Hg и As с учетом всей группы подвижных форм соединений данных элементов в почве.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 03 августа 2025 года

Подписана к печати: 14 декабря 2025 года

Введение

Основными критериями современного растениеводства являются ресурсоэнергоёмкость, экологическая устойчивость, природоохранность и рентабельность. При ведении сельскохозяйственного производства важна не только продукционная, но и средообразующая, ресурсовосстанавливающая, почвозащитная и почвоулучшающая агротехнология (Дышко, 2023). Для России, где свыше 70 % сельскохозяйственных земель находятся в зоне температурного и водного дефицита, способность растений обеспечивать устойчивую продуктивность в неблагоприятных и даже экстремальных условиях среды имеет первостепенное значение.

Жидкий навоз – это сложное удобрение. При определении дозы следует исходить, прежде всего, из потребности растений в основных элементах питания (Кольга и др., 2017; Бобренко и др., 2018, 2019, 2023; Комякова и др., 2020). Однако при неграмотном использовании жидких отходов животноводства в качестве удобрений происходит перенасыщение пахотного слоя почвы питательными веществами, а также увеличение содержания в нем подвижных форм тяжелых металлов (ТМ) и металлоидов (Тиво, 2019; Бобренко и др., 2021а).

Актуальность темы заключается в том, что с увеличением дозы внесения бесподстилочного навоза повышаются риски роста токсичности почвы в результате накопления таких ТМ, как Zn, Pb, Cd, Hg и др., способных к миграции в ландшафте (Тарасов и др., 2020; Тарасов, 2020а). Поскольку ТМ поступают в организм человека и травоядных животных в основном с растительной пищей, исследования особенностей содержания, накопления и поведения ТМ в почвах приобретают важное значение (Тарасов и др., 2018; Тарасов, 2020б).

Цель исследования – агроэкологическая оценка поведения Hg и As в системе «почва – растение» в результате применения жидкого органического удобрения (ЖОУ) на основе свиного бесподстилочного навоза (СБН).

Материалы

Согласно требованиям ГОСТ 17.4.3.06-2020, краткосрочные исследования не позволяют достоверно определить влияние длительного систематического применения высоких доз бесподстилочного навоза на изменение физических, агрохимических, токсикологических, биологических свойств по-

чвы, на урожайность сельскохозяйственных культур, качество, безопасность продукции растениеводства. В связи с этим исследования проводились в 2015–2017 гг. на опытном поле ООО «РУСКОМ-Агро» Кормиловского района Омской области в рамках Проекта на применение жидких органических удобрений с учетом естественного плодородия почв в подзоне южной лесостепи Омской области на лугово-черноземной почве (Бобренко и др., 2018, 2019; Погуляй и др., 2018).

Название почвы: лугово-черноземная глыбосолончаковатая маломощная среднегумусовая, расположена в южной лесостепной зоне Западной Сибири. По морфологическим признакам лугово-черноземная почва в пределах первого метра не отличается от черноземов. Для почвенного профиля характерны: глыбисто-комковатая структура и трещиноватое сложение. По мощности гумусового слоя (28 см) относится к маломощным. Содержание гумуса в слое 0–28 см – 5.9 % (среднегумусовая почва); с глубиной его содержание резко уменьшается и в горизонте В1 его уже 1.8 %. В горизонте Апах в составе поглощенных оснований преобладает кальций – 23.6–20.4 мг-экв/100 г, pH водной вытяжки равна 6.8.

Глубина залегания грунтовых вод – 3.5–4 м. По структурному составу почва является хорошо агрегатированной (по результатам определения количества водопрочных агрегатов методом «мокрого» агрегатного анализа, водопроницаемости почвы – методом трубок по Качинскому); по водопрочности – средневодопрочной и, следовательно, агрономически ценной. Почвообразующие породы – покровные карбонатные и засоленные тяжелые суглинки и глины.

В опыте изучали действие и последствие (в течение двух лет) ЖОУ на основе СБН на урожайность и качество зерна, а также на содержание ртути (Hg) и мышьяка (As) в почве, миграцию данных элементов в сельскохозяйственную культуру (сорт пшеницы мягкой яровой Памяти Азиева) и накопление их в зерне. Предшественником яровой пшеницы являлся горох. Закладку опыта, все учеты и наблюдения производили по общепринятым методикам. Агротехника общепринятая для зоны. Опыт был заложен в трехкратной повторности. Размер каждой делянки: ширина 6 м, длина 20 м. Расположение делянок систематическое. Срок внесения органического удобрения – май в год действия перед посевом; подача ЖОУ СБН производилась с помощью дизельной насо-

сной станции JD 6068HF158 с насосом Cornell 4NHTV по шланговой системе с использованием культиватора с инжектированием. Отбор растительных образцов (корни, зеленая масса / солома, зерно) был приурочен к фазам цветения и полной спелости, а почвенных – в октябре соответствующего года действия и двух лет последствия органиче-

ского удобрения. ЖОУ СБН вносилось на все делянки с разной нормой внесения по схеме полевого опыта, кроме первого – контроля. Схема опыта: 1) без удобрений (контроль); 2) 50 т/га; 3) 100 т/га; 4) 150 т/га; 5) 200 т/га; 6) 250 т/га; 7) 300 т/га. Физико-химические свойства ЖОУ на основе СБН представлены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства жидких органических удобрений на основе свиного бесподстилочного навоза

Год	Сухое в-во, %	pH	Орг. в-во, %	Содержание элементов питания, %			Валовое содержание ТМ, мг/кг сухого в-ва			
				N _{общ}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Pb	Cd	Hg	As
Жидкая фракция свиного навоза										
2015	0.5	8.3	1.7	0.24	0.03	0.1	5.73	0.71	0.007	1.0
Твердая фракция свиного навоза										
2015	26.1	8.2	81.0	0.58	0.97	0.2	1.58	0.34	0.01	1.2

Методы

Валовое содержание и формы соединений Hg и As в почве в слой почвы 0–20 см определено методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ААС). Легкодоступные формы: подвижные (обменные) – в вытяжке аммонийно-ацетатного буфера (ААБ) при рН 4.8 (при соотношении почва:раствор 1:5, время экстракции 18 часов), характеризующие актуальный запас элементов в почве; водорастворимые, извлекаемые дистиллированной водой; кислоторастворимые – извлекаемые 1М раствором HNO₃ (Методические указания..., 1992). Тяжелые металлы в растениях определены методом мокрого озоления в смеси кислот HNO₃ + HCl с последующим определением на ААС.

Статистическая обработка данных включала расчет среднего арифметического значения и стандартной ошибки среднего и была произведена с помощью программного обеспечения StatSoft, Inc. (2011) Statistica (data analysis software system), version 10.

Результаты

В результате физико-химического исследования ЖОУ СБН установлено, что концентрация сухого вещества в нем составляет 0.8 %, содержание тяжелых металлов (мг/кг сух. в-ва): Pb – 5.73, Cd – 0.71, Hg – 0.007, As – 1.0. В соответствии с нормативными документами (ГОСТ Р 17.4.3.07-2001, ГОСТ Р 53117-2008) при применении органических удобрений на основе отходов животноводства нормативами для вышеперечисленных ТМ и металлоидов являются (не более мг/кг): Pb – 130, Cd – 2, Hg – 2.1, As – 10. Таким

образом, применяемое ЖОУ СБН с санитарных и экологических позиций является безопасным и пригодным для использования в сельскохозяйственном обороте (Бобренко и др., 2021б; Бобренко и др., 2022).

Исследованием установлено, что оптимальная доза жидкой фракции свиного навоза на лугово-черноземной почве под яровую пшеницу – 200 т/га (Бобренко и др., 2022; Шалак, 2023). Яровая пшеница в условиях лесостепи Омской области за вегетацию сформировала урожайность в среднем за годы исследований без внесения удобрений 2.70 т/га, при внесении удобрений – 3.06–4.14 т/га. Наиболее эффективным было применение 200 т/га – прибавка урожая составила 1.43 т, или 53.02 %. Увеличение дозы до 250 т/га было менее эффективно, а при внесении 300 т/га отмечалось существенное снижение урожайности культуры по сравнению с дозой 200 т/га (рис. 1).

Применение ЖОУ СБН приводит к увеличению валового содержания мышьяка и ртути и форм их соединений в слой 0–20 см (табл. 2).

Обсуждение

Установлено, что валовое содержание As в почве было максимальным при дозе внесения ЖОУ СБН 300 т/га (6.9 мг/кг). При этом в контрольном варианте содержание As составляло 6.2 мг/кг. Оба значения не превышают фоновое для региона (10.0 мг/кг) и ОДК для нейтральных суглинистых и глинистых почв (10.0 мг/кг), но превышают величину ПДК (2.0 мг/кг). В аналогичных условиях содержание Hg на контроле составляло

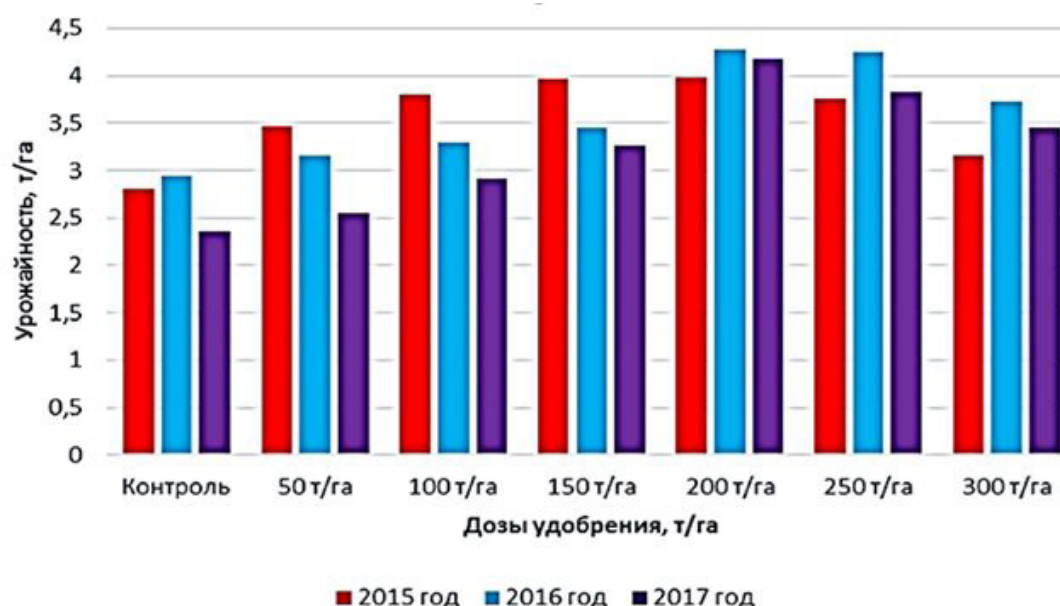


Рис. 1. Урожайность яровой пшеницы при действии и последействии ЖОУ СБН на лугово-черноземной почве в условиях юга Западной Сибири (2015–2017 гг.)

Fig. 1. The yield of spring wheat under the action and aftereffect of liquid organic fertilizer based on pig manure in meadow-chernozem soil in the conditions of the south of Western Siberia (2015–2017)

0.014 мг/кг. Внесение удобрения приводило к возрастанию валового содержания элемента в почве и при дозе внесения 300 т/га составляло 0.019 мг/кг. Содержание Hg во всех вариантах опыта находилось в пределах как фонового значения (0.02 мг/кг), так и ПДК (2.1 мг/кг) (рис. 2, 3). Особенность почв Омской области заключается в том, что при оценке загрязнений необходимо сравнивать результат не с ПДК, а с величиной фона по Омской области, равной 10.0 мг/кг. Поскольку ПДК Hg выше кларка элемента по А. П. Виноградову в 42 раза, ОДК As для нейтральных суглинистых почв выше кларка в 2 раза, а регионального фонового значения в 4.55 раза и ПДК в 2 раза, у ученых и практиков возникает много вопросов по научной обоснованности отечественных нормативов (Безуглова и др., 2012) и требует их корректировки.

Внесение ЖОУ СБН приводило к возрастанию как валового содержания As в почве, так и форм его соединений. Однако в два ближайших года последействия удобрения отмечена тенденция к уменьшению как валового содержания As в почве, так и форм его соединений. При этом содержание форм соединений данного элемента в почве можно выразить следующим рядом: водорастворимые формы < кислоторастворимые формы < обменные формы. Содержание обменных форм As в почве составляло 16.9–21.7 % от валового содержания элемента в год дей-

ствия и 21.0–22.8 % – в два ближайших года последействия. Максимальным оно было при внесении в почву ЖОУ СБН в дозе 300 т/га. Содержание водорастворимых форм As в год действия и в два ближайших года последействия не превышало 0.11 %, а кислоторастворимых форм – 0.28 % от валового содержания элемента.

Аналогично мышьяку внесение ЖОУ СБН приводило к возрастанию как валового содержания Hg в почве, так и форм его соединений. Ввиду ограниченной чувствительности прибора не удалось наблюдать динамику содержания водорастворимых и обменных форм Hg в почве. Однако кислоторастворимые формы, как и валовое содержание, с увеличением дозы внесения ЖОУ СБН имели тенденцию к накоплению. При этом содержание форм соединений данного элемента в почве можно выразить следующим рядом: водорастворимые формы ≈ обменные формы < кислоторастворимые формы. В отличие от мышьяка при внесении ЖОУ СБН в почву накапливаются кислоторастворимые формы ртути; их содержание составляло 28.6–31.6 % от валового содержания элемента в год действия (в зависимости от дозы внесения ЖОУ СБН) до 33.3 % – в два ближайших года последействия.

Таким образом, накопление Hg и As в почве в год внесения (2015 г.) и в два года последействия (2016–2017 гг.) носило относительно стабильный характер. С увеличением

Таблица 2. Содержание форм соединений Hg и As в почве (мг/кг) при применении жидких органических удобрений на основе свиного бесподстилочного навоза

Вариант опыта	Металл / формы соединений ¹							
	Hg				As			
	1	2	3	4	1	2	3	4
2015 год (действие)								
Контроль	0.014±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	6.2± 0.87	0.006±0.001	0.015±0.001	1.05±0.12
50 т/га	0.014±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	6.3± 0.77	0.006±0.001	0.017±0.002	1.05±0.1
100 т/га	0.015±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	6.5± 0.74	0.006±0.001	0.017±0.002	1.41±0.1
150 т/га	0.015±0.002	менее 0.0002	0.005±0.001	менее 0.0002	6.6± 0.71	0.006±0.001	0.017±0.002	1.45±0.14
200 т/га	0.017±0.002	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.7± 0.67	0.006±0.001	0.015±0.002	1.47±0.14
250 т/га	0.018±0.002	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.8± 0.72	0.006±0.001	0.016±0.002	1.45±0.16
300 т/га	0.019±0.003	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.9± 0.77	0.007±0.001	0.019±0.004	1.5±0.18
2016 год (1-й год последствий)								
Контроль	0.012±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	4.6± 0.7	0.004±0.001	0.015±0.001	1.05±0.1
50 т/га	0.012±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	4.9± 0.77	0.005±0.001	0.015±0.002	1.15±0.12
100 т/га	0.014±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	5.6± 0.64	0.005±0.001	0.016±0.002	1.31±0.15
150 т/га	0.014±0.002	менее 0.0002	0.005±0.001	менее 0.0002	5.9± 0.71	0.006±0.001	0.016±0.002	1.4±0.14
200 т/га	0.015±0.002	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.3± 0.67	0.006±0.001	0.017±0.002	1.4±0.17
250 т/га	0.015±0.002	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.7± 0.7	0.006±0.001	0.017±0.002	1.45±0.17
300 т/га	0.018±0.003	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.9± 0.71	0.007±0.001	0.019±0.004	1.49±0.19
2017 год (2-й год последствий)								
Контроль	0.012±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	4.9± 0.7	0.005±0.001	0.015±0.001	1.03±0.1
50 т/га	0.012±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	4.9± 0.57	0.005±0.001	0.015±0.002	1.1±0.1
100 т/га	0.014±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	5.3± 0.64	0.005±0.001	0.015±0.002	1.21±0.17
150 т/га	0.014±0.002	менее 0.0002	0.005±0.001	менее 0.0002	5.5± 0.51	0.005±0.001	0.016±0.002	1.3±0.15
200 т/га	0.015±0.002	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	5.7± 0.61	0.006±0.001	0.017±0.002	1.35±0.15
250 т/га	0.015±0.002	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	5.9± 0.62	0.006±0.001	0.017±0.002	1.39±0.16
300 т/га	0.018±0.003	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.4± 0.7	0.006±0.001	0.017±0.003	1.45±0.18
Фон ³ (мг/кг)	0.02				9.1			
Кларк ⁴ (мг/кг)	0.12				5			
ОДК, мг/кг ⁵					10			
ПДК, мг/кг ⁶	2.1				2			
Нормативы для ЖОУ СБН, не более ²	2.1				10			

Примечание. Здесь и в табл. 3 приведены значения среднего арифметического и стандартная ошибка среднего; ¹ – 1) валовое содержание; 2) водорастворимые формы (извлекаемые дистил. водой); 3) кислоторастворимые формы (извлекаемые 1М раствором HNO₃ для ртути – 1М HCl); 4) обменные формы (извлекаемые ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4.8 (по Крупскому); ² – нормативы по ГОСТ Р 53117-2008; ³ – региональное фоновое содержание (по: Ежегодник. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011; О состоянии..., 2010); ⁴ – кларк в почвах мира по А. П. Виноградову (Виноградов, 1993); ⁵ – ГН 2.1.7.2511-09; ⁶ – СанПин 1.2.3685-21.

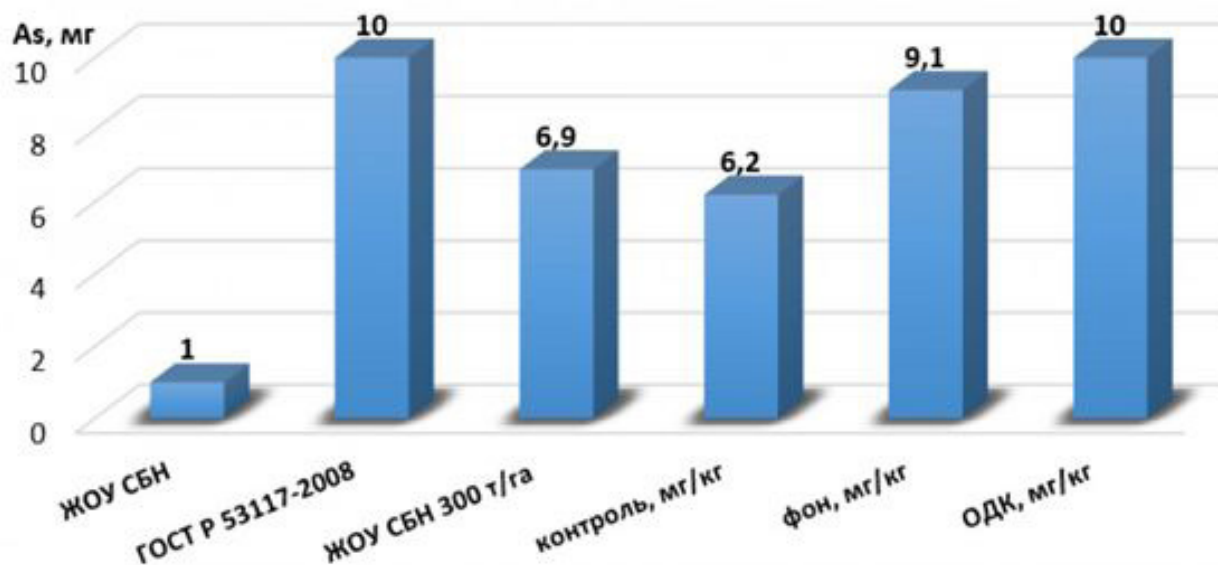


Рис. 2. Накопление мышьяка в лугово-черноземной почве при максимальной дозе внесения ЖОУ СБН (300 т/га) в год внесения удобрения (2015 г.)

Fig. 2. Accumulation of arsenic in meadow-chernozem soil at the maximum dose of liquid organic fertilizer based on pig manure (300 t/ha) per year of fertilization (2015)

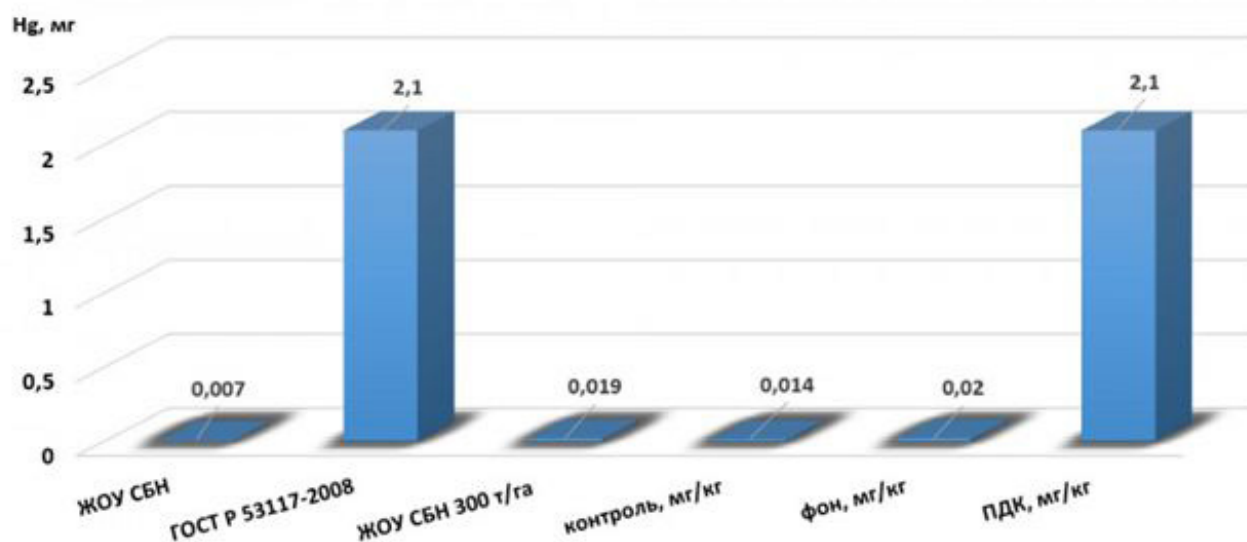


Рис. 3. Накопление ртути в лугово-черноземной почве при максимальной дозе внесения ЖОУ СБН (300 т/га) в год внесения удобрения (2015 г.)

Fig. 3. Accumulation of mercury in meadow-chernozem soil at the maximum dose of liquid organic fertilizer based on pig manure (300 t/ha) per year of fertilization (2015)

дозы внесения ЖОУ СБН валовое содержание Hg и As в почве в год внесения пропорционально возрастало. Внесение удобрения в дозе 300 т/га привело к увеличению валового содержания Hg в 1.36 раза, а As – 1.1 раза по сравнению с контрольным вариантом. Несмотря на то что валовое содержание Hg в почве увеличивалось, содержание водорастворимых форм было незначительным (менее 0.2 мкг/кг). Содержание обменных форм ртути также было менее 0.2 мкг/кг. Изучение содержания исследуемых элементов в почве в два года последствий ЖОУ СБН показало, что валовое содержание и содержание форм соединений носило тенденцию к снижению. Это может быть объяснено несколькими причинами, например, выносом элементов с урожаем, а также трансформацией форм соединений элементов с протекающими в почве различными процессами. Сравнительные данные свидетельствуют,

что превышений ПДК/ОДК по изучаемым элементам как в год действия, так и в два года последствий ЖОУ СБН не отмечалось. Поскольку ртуть, как правило, концентрируется в верхнем слое почв, так как связана с уровнем содержания органики, железа, серы (Гладышев, 2000), то контроль за поступлением элемента имеет очень важное экологическое значение.

Установлено, что для растений пшеницы характерен акропетальный характер накопления Hg и As. Распределение данных элементов по органам пшеницы как на контрольной почве, так и на почве с использованием ЖОУ СБН было следующим: корни > солома > зерно.

Содержание Hg в корнях в фазу цветения на контрольном варианте было минимальное – 0.3 мкг/кг; максимум – при внесении удобрения в дозе 300 т/га – 0.33 мкг/кг (табл. 3).

Таблица 3. Содержание Hg и As в растениях яровой мягкой пшеницы Памяти Азиева при применении жидких органических удобрений на основе свиного бесподстильного навоза

Вариант опыта	Металл / вегетативный орган ¹					
	Hg (мкг/кг)			As (мг/кг)		
	1	2	3	1	2	3
2015 год (действие)						
Фаза цветения						
Контроль	0.3±0.031	0.015±0.001	–	0.16±0.01	0.026±0.002	–
50 т/га	0.27±0.03	0.017±0.001	–	0.14±0.01	0.021±0.002	–
100 т/га	0.31±0.03	0.017±0.002	–	0.16±0.01	0.024±0.002	–
150 т/га	0.31±0.03	0.019±0.002	–	0.17±0.01	0.027±0.003	–
200 т/га	0.3±0.03	0.021±0.002	–	0.15±0.01	0.023±0.002	–
250 т/га	0.32±0.03	0.02±0.002	–	0.18±0.01	0.026±0.002	–
300 т/га	0.33±0.03	0.026±0.003	–	0.19±0.02	0.029±0.003	–
Фаза полной спелости						
Контроль	0.3±0.031	0.017±0.002	0.005	0.16±0.01	0.029±0.003	0.021±0.002
50 т/га	0.3±0.03	0.021±0.002	0.01	0.14±0.01	0.026±0.002	0.02±0.002
100 т/га	0.33±0.03	0.021±0.002	0.006	0.16±0.01	0.026±0.002	0.019±0.002
150 т/га	0.33±0.03	0.024±0.002	0.006	0.17±0.01	0.029±0.003	0.02±0.001
200 т/га	0.31±0.03	0.026±0.003	0.01	0.15±0.01	0.027±0.002	0.018±0.001
250 т/га	0.34±0.03	0.025±0.003	0.005	0.16±0.01	0.03±0.003	0.019±0.002
300 т/га	0.36±0.03	0.028±0.003	0.007	0.16±0.02	0.03±0.003	0.015±0.001
2016 год (1-й год последствий)						
Фаза цветения						
Контроль	0.28±0.03	0.015±0.001	–	0.13±0.01	0.021±0.002	–
50 т/га	0.3±0.03	0.015±0.001	–	0.14±0.01	0.021±0.002	–
100 т/га	0.29±0.03	0.017±0.002	–	0.14±0.01	0.02±0.002	–
150 т/га	0.3±0.03	0.019±0.002	–	0.12±0.01	0.019±0.001	–
200 т/га	0.31±0.03	0.02±0.002	–	0.15±0.01	0.022±0.002	–
250 т/га	0.31±0.03	0.02±0.002	–	0.17±0.01	0.022±0.002	–
300 т/га	0.31±0.03	0.021±0.002	–	0.17±0.02	0.025±0.003	–
Фаза полной спелости						
Контроль	0.3±0.028	0.017±0.001	0.009	0.15±0.01	0.026±0.003	0.02±0.001
50 т/га	0.3±0.03	0.015±0.001	0.01	0.14±0.01	0.025±0.002	0.02±0.002
100 т/га	0.31±0.03	0.019±0.002	0.01	0.16±0.01	0.025±0.002	0.016±0.002
150 т/га	0.3±0.03	0.02±0.002	0.008	0.16±0.01	0.027±0.002	0.019±0.001
200 т/га	0.33±0.03	0.021±0.002	0.01	0.15±0.01	0.027±0.003	0.018±0.001
250 т/га	0.33±0.03	0.02±0.002	0.009	0.18±0.01	0.026±0.003	0.02±0.002
300 т/га	0.31±0.03	0.023±0.002	0.008	0.19±0.02	0.028±0.003	0.017±0.001

Таблица 3. Продолжение

Вариант опыта	Металл / вегетативный орган ¹					
	Hg (мкг/кг)			As (мг/кг)		
	1	2	3	1	2	3
2017 год (2-й год последствий)						
Фаза цветения						
Контроль	0.26±0.029	0.013±0.001	–	0.11±0.01	0.017±0.002	–
50 т/га	0.27±0.025	0.013±0.001	–	0.13±0.01	0.019±0.002	–
100 т/га	0.25±0.021	0.015±0.002	–	0.13±0.01	0.02±0.002	–
150 т/га	0.28±0.03	0.019±0.002	–	0.12±0.01	0.018±0.002	–
200 т/га	0.28±0.03	0.021±0.002	–	0.15±0.01	0.02±0.002	–
250 т/га	0.3±0.03	0.021±0.002	–	0.14±0.01	0.02±0.002	–
300 т/га	0.3±0.03	0.022±0.002	–	0.15±0.02	0.023±0.002	–
Фаза полной спелости						
Контроль	0.28±0.026	0.013±0.001	0.01	0.13±0.01	0.019±0.002	0.021±0.001
50 т/га	0.28±0.029	0.012±0.001	0.008	0.14±0.01	0.021±0.002	0.021±0.002
100 т/га	0.3±0.03	0.015±0.001	0.01	0.14±0.01	0.02±0.002	0.019±0.002
150 т/га	0.3±0.03	0.018±0.002	0.009	0.15±0.01	0.022±0.002	0.015±0.001
200 т/га	0.3±0.03	0.02±0.002	0.01	0.15±0.01	0.023±0.002	0.017±0.001
250 т/га	0.3±0.03	0.02±0.002	0.01	0.14±0.01	0.023±0.002	0.019±0.002
300 т/га	0.31±0.03	0.022±0.002	0.009	0.17±0.01	0.025±0.003	0.019±0.001
ПДК, мг/кг ²	0.03			0.2		
ДУ, мг/кг ³	0.03			0.2		

Примечание. ¹ – 1) корни; 2) зеленая масса / солома; 3) зерно; ² – решение Комиссии таможенного союза ЕЭС от 09.12.2011; ³ – Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 14.11.2001 № 36.

В зеленой массе содержание Hg было в пределах от 0.015 (на контроле) до 0.026 мкг/кг (при максимальной дозе внесения ЖОУ СБН). Полная спелость показала схожую тенденцию по содержанию Hg в корнях и соломе по сравнению с фазой цветения. Содержание Hg зерне как в год действия, так и в два года последствий находилось в пределах от 0.005 до 0.01 мкг/кг и не зависело от дозы вносимого в почву удобрения. Содержание элемента на контроле находилось в этих же пределах. При этом данные величины не выходили за пределы требований нормативных документов по содержанию Hg в зерне.

При внесении удобрения содержание As в корнях в фазу цветения на контрольном варианте было минимальным (0.16 мг/кг), а максимум был при дозе внесения удобрения 300 т/га – 0.19 мг/кг. При этом в зеленой массе содержание мышьяка было от 0.026 на контроле до 0.029 мг/кг при максимальной дозе внесения удобрения. В фазу восковой спелости зерна в корнях в год действия удобрения было отмечено снижение концентрации металла. При этом отмечалась тенденция накопления мышьяка в соломе по сравнению с фазой цветения. В зерне содержание варьировало от 0.021 до 0.015 мг/кг. В следующие два года последствий наблюдалось уменьшение содержания As в органах растений как по фазам вегетации, так и по вариантам внесения и по годам опыта.

Результаты исследований биологических объектов (корни, солома, зерно пшеницы) свидетельствуют, что значительная часть Hg, As задерживалась в корнях растений, что указывает на существование защитных барьеров, препятствующих их поступлению и накоплению в генеративных органах. Большее по сравнению с другими частями растений накопление металлов в корнях, вероятно, может быть объяснено тем, что при проникновении в плазму происходит инактивация и депонирование значительных их количеств в результате образования малоподвижных соединений с органическим веществом. Поглощенные корнями элементы находятся в свободном клеточном пространстве или используются в процессах метаболизма.

Показателем степени накопления элементов растениями является коэффициент биологического поглощения (КБП). КБП – это отношение содержания элемента в золе растений (Р) к валовому содержанию его в почве (П): $КБП = Р/П$. КБП позволяет косвенно судить о степени доступности элемента для растений и его поведении в системе «почва – растение» (Дегтярёв, 2024). В соответствии с величиной КБП Hg и As относятся к группе элементов слабого и очень слабого захвата (табл. 4). Таким образом, на протяжении жизни данные элементы лишь захватываются организмом пшеницы, но не накапливаются.

Таблица 4. КБП Hg и As органами растений при применении жидких органических удобрений на основе свиного бесподстилочного навоза

Вариант опыта	Металл / вегетативный орган					
	Hg			As		
	корни	солома	зерно	корни	солома	зерно
2015 год (действие)						
Контроль	0.021	0.0012	0.0004	0.03	0.005	0.003
50 т/га	0.021	0.0015	0.0007	0.02	0.004	0.003
100 т/га	0.022	0.0014	0.0004	0.02	0.004	0.003
150 т/га	0.022	0.0016	0.0004	0.03	0.004	0.003
200 т/га	0.018	0.0015	0.0006	0.02	0.004	0.003
250 т/га	0.018	0.0014	0.0003	0.02	0.004	0.003
300 т/га	0.018	0.0015	0.0003	0.02	0.004	0.002
2016 год (1-й год последствий)						
Контроль	0.025	0.0014	0.0008	0.03	0.006	0.004
50 т/га	0.025	0.0012	0.0008	0.03	0.005	0.004
100 т/га	0.022	0.0013	0.0007	0.03	0.004	0.003
150 т/га	0.021	0.0014	0.0006	0.03	0.005	0.003
200 т/га	0.022	0.0014	0.0007	0.02	0.004	0.003
250 т/га	0.022	0.0013	0.0006	0.03	0.004	0.002
300 т/га	0.017	0.0013	0.0004	0.03	0.004	0.002
2017 год (2-й год последствий)						
Контроль	0.012	0.006	0.0005	0.03	0.004	0.004
50 т/га	0.018	0.008	0.0005	0.02	0.004	0.004
100 т/га	0.021	0.01	0.0007	0.03	0.004	0.004
150 т/га	0.021	0.013	0.0006	0.03	0.004	0.003
200 т/га	0.02	0.013	0.0007	0.03	0.004	0.003
250 т/га	0.02	0.013	0.0007	0.02	0.003	0.003
300 т/га	0.017	0.012	0.0005	0.03	0.004	0.003

Оценивая величину КБП, следует отметить, что наблюдается тенденция накопления в вегетативных органах более значительных количеств поллютанта, чем в генеративных. В связи с этим более информативным критерием оценки количества металлов, перешедших из почвы в растения, является коэффициент накопления (Кн), или коэффициент биологической (биогеохимической) подвижности (Дьяконов и др., 1996). Он рассчитывается как отношение содержания элемента в золе растений (P_z) к содержанию его подвижных форм в почве ($P_{пф}$), так как именно они доступны растениям: $K_n = P_z / P_{пф}$. При использовании ЖОУ на основе СБН установлено некоторое увеличение Кн в корневой системе и в зеленой массе (солома), но уменьшение в зерне для Hg и As, что, вероятно, обусловлено защитной реакцией растений на избыток элементов в почве. Наиболее значимое уменьшение характерно для обменных форм мышьяка (табл. 5).

Следует отметить, что оценка накопления различных элементов в растениях, полученных на основе показателей КБП и Кн, неоднозначна. Это связано с тем, что растения могут использовать не только обменные формы элементов (экстракция ААБ), но и другие подвижные формы, содержание которых увеличивается с ростом загрязнения. Таким образом, при расчете Кн желательно оценивать содержание всей группы подвиж-

ных соединений элементов, включая обменные, комплексные и специфически сорбированные формы (экстракция 1М HCl за минусом количества ТМ, извлекаемых ААБ).

Одним из показателей накопления элементов растениями является величина биологического выноса ТМ с урожаем. Биологический вынос с основной и побочной продукцией определяется величиной урожая, содержанием металлов в растениях, а также биологическими особенностями возделываемых культур (табл. 6).

Зерно яровой мягкой пшеницы при применении ЖОУ в оптимальной дозе удобрения 200 т/га выносит Hg в среднем за 3 года 0.004 % от валового содержания его в почве, но 13.5 % от общего количества данного элемента, поступившего в почву с ЖОУ. Вынос As с урожаем пшеницы (зерно + солома) в среднем за 3 года составил 0.005 % от валового содержания в почве, или 19.1 % от общего количества данного элемента, поступившего в почву с ЖОУ. Ввиду того, что значительная часть металлов концентрируется в корнях, вынос элементов с урожаем одновременно сопровождался возвратом части этих же элементов в почву. Оставшиеся ТМ в почве со временем вымываются и тем самым загрязняют нижние горизонты почвы. Регулярное внесение высоких доз удобрений может привести не только к увеличению содержания ТМ, но и к их накоплению в почве. Из-

Таблица 5. Коэффициент накопления (K_n) обменных форм As органами растений при применении жидких органических удобрений на основе свиного бесподстилочного навоза

Вариант опыта	K_n (ААБ)		
	корни	солома	зерно
2015 год (действие)			
Контроль	0.12	0.02	0.02
50 т/га	0.13	0.02	0.02
100 т/га	0.11	0.018	0.013
150 т/га	0.12	0.02	0.014
200 т/га	0.10	0.018	0.012
250 т/га	0.11	0.02	0.013
300 т/га	0.11	0.02	0.01
2016 год (1-й год последействия)			
Контроль	0.13	0.022	0.017
50 т/га	0.12	0.021	0.017
100 т/га	0.12	0.019	0.012
150 т/га	0.11	0.019	0.013
200 т/га	0.10	0.019	0.012
250 т/га	0.12	0.017	0.013
300 т/га	0.12	0.018	0.011
2017 год (2-й год последействия)			
Контроль	0.12	0.018	0.02
50 т/га	0.13	0.019	0.019
100 т/га	0.12	0.017	0.016
150 т/га	0.12	0.017	0.012
200 т/га	0.11	0.017	0.013
250 т/га	0.1	0.017	0.014
300 т/га	0.12	0.017	0.013

Таблица 6. Вывод Hg и As из почвы (г/га) с урожаем при применении жидких органических удобрений на основе свиного бесподстилочного навоза

Вариант опыта	Элемент	
	Hg	As
Контроль	0.00002	0.059
50 т/га	0.00008	0.062
100 т/га	0.00002	0.059
150 т/га	0.00002	0.064
200 т/га	0.00004	0.073
250 т/га	0.00003	0.076
300 т/га	0.00002	0.058

быточное накопление ТМ будет приводить к эрозии почвы, изменению ее состава. Также это повлечет за собой снижение урожайности и накопление в зерне ТМ.

Заключение

Содержание ртути и мышьяка в лугово-черноземной маломощной среднегумусной почве ООО «РУСКОМ-Агро» Кормиловского муниципального района Омской области не превышает ОДК и ПДК.

Концентрация сухого вещества в ЖОУ на основе СБН составляет 0.8 %, содержание тяжелых металлов (мг/кг сух. в-ва): Hg – 0.007, As – 1.0, что с санитарных и экологических позиций является безопасным и пригодным для использования в сельскохозяйственном обороте.

Внесение ЖОУ на основе СБН в качестве органического удобрения ведет к увеличению содержания в почве Hg, As как в год действия, так и в ближайшие годы последействия. Поскольку внесение 200 т/га органического удобрений в лугово-черноземную почву под яровую пшеницу, хотя и обеспечивает максимальный прирост урожая, приводит к умеренному увеличению валового содержания ртути и мышьяка (в 1.21 и 1.08 раза соответственно), эта доза должна быть установлена как предельная, обеспечивающая экологическое благополучие.

Внесение ЖОУ на основе СБН в качестве органического удобрения ведет к повышению содержания Hg, As во всех органах сорта яровой мягкой пшеницы Памяти Азиева (корень, солома, зерно) в период вегетации и

сбора урожая. Распределение элементов по органам пшеницы как на контрольной, так и на почве с использованием ЖОУ на основе СБН следующее: корни > солома > зерно. Корни являются защитным барьером, препятствующим поступлению и накоплению металлов в генеративных органах.

В результате биологического выноса элементов с урожаем происходит изменение их

содержания в почве во времени. Вынос элементов с зерном в год действия и два ближайших года последствий не превышает 0.01 % от валового содержания их в почве и 15 % от количества, поступившего с органическими удобрениями. Регулярное бессистемное внесение высоких доз ЖОУ на основе СБН может привести к их накоплению в почве и изменению ее состава и свойств.

Библиография

- Безуглова О. С., Околелова А. А. О нормировании содержания мышьяка в почвах // Живые и биокосные системы. 2012. № 1. URL: <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2012-1-7> (дата обращения: 10.05.2025).
- Бобренко И. А., Гоман Н. В., Кормин В. П., Трубина Н. К. Использование бесподстилочного свиного навоза в земледелии Омской области: рекомендации производству. Омск: Изд-во ФГБОУ ВО ОмГАУ им. П. А. Столыпина, 2021б. 44 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48083300> (дата обращения: 10.05.2025).
- Бобренко И. А., Гоман Н. В., Кормин В. П., Шалак И. О. Использование свиного бесподстилочного навоза для оптимизации питания зерновых культур. Омск: Изд-во ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2023. 127 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67781796>
- Бобренко И. А., Гоман Н. В., Кормин В. П., Шмидт А. Г. Влияние свиного бесподстилочного навоза на продуктивность картофеля на лугово-черноземной почве южной лесостепи Омской области // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33, № 3. С. 23–25.
- Бобренко И. А., Гоман Н. В., Трубина Н. К., Кормин В. П., Шалак И. О. Применение органических удобрений на основе твердой фракции свиного бесподстилочного навоза при возделывании яровой пшеницы // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2021а. № 1 (41). С. 5–12. DOI: 10.48136/2222-0364_2021_1_5
- Бобренко И. А., Гоман Н. В., Трубина Н. К., Шмидт А. Г. Оптимизация применения свиного бесподстилочного навоза под ячмень на лугово-черноземной почве южной лесостепи Западной Сибири // Земледелие. 2018. № 7. С. 23–25. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10706
- Бобренко И. А., Шалак И. О., Гоман Н. В., Трубина Н. К., Кормин В. П. Эффективность применения свиного бесподстилочного навоза под зерновые культуры // Вестник Омского ГАУ. 2022. № 1 (45). С. 13–19. DOI: 10.48136/2222-0364_2022_1_13
- Виноградов Б. В. Биотические критерии выделения зон экологического бедствия России // Известия РАН. Серия географическая. 1993. № 5. С. 13–27.
- Гладышев В. П. Хемодинамика и мониторинг ртути в окружающей среде // Материалы Симпозиума «Контроль и реабилитация окружающей среды» / Под общ. ред. М. В. Кабанова, Н. П. Солдаткина. Томск: Изд-во «Спектр» Института оптики атмосферы СО РАН, 2000. С. 34–38.
- ГН 2.1.7.2511-09. Гигиенические нормативы. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 10 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/708/4293828439.pdf> (дата обращения: 10.05.2025).
- ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений. М.: Стандартинформ, 2008. 5 с.
- ГОСТ Р 53117-2008. Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия. (Актуализ. 01.07.2023). М.: Стандартинформ, 2020. 15 с.
- ГОСТ 17.4.3.06-2020. Охрана природы. Почвы. Общие требования к классификации почв по влиянию на них химических загрязняющих веществ. М.: Стандартинформ, 2020. 14 с.
- Дегтярёв А. П. Коэффициенты биологического накопления как основа биохимической классификации химических элементов // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». 2024. Т. 16, № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsienty-biologicheskogo-nakopleniya-kak-osnova-biohimicheskoy-klassifikatsii-himicheskikh-elementov/viewer> (дата обращения: 10.05.2025).
- Дышко В. Н. Современные проблемы и инновационные технологии в агрономии: Курс лекций для магистров. Смоленск: ФГБОУ ВО Смоленская ГСХА, 2023. 118 с.
- Дьяконов К. Н., Касимов Н. С., Тикунов В. С. Современные методы географических исследований. М.: АО «Издательство «Просвещение», 1996. С. 62–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40347123> (дата обращения: 10.05.2025).
- Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхожде-

- ния в 2010 году . Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011.
- Кольга Д. Ф., Васько А. С. Переработка навоза в экологически безопасные органические удобрения . Минск: БГАТУ, 2017. 128 с.
- Комякова Е. М., Антонова О. И. Состав навоза КРС и свиней, особенности использования и перспективы переработки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 6 (188). С. 63–68.
- Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продуктах растениеводства.. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: ЦИНАО, 1992. 63 с.
- О состоянии и об охране окружающей среды Омской области в 2009 году : / Правительство Омской обл., М-во сельского хоз-ва и продовольствия Омской обл.; . Омск: Омскбланкиздат, 2010. 200 с.
- Погуляй И. О., Николаева Д. А. Влияние жидкого свиного навоза на урожайность зерна яровой пшеницы в условиях Омской области // I региональная (заочная) научно-практическая конференция молодых ученых и обучающихся, посвященная 100-летию Омского государственного аграрного университета. Омск: Изд-во ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2018. С. 323–327.
- Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 14.11.2001 № 36 (ред. от 06.07.2011) «О введении в действие Санитарных правил» (вместе с «СанПиН 2.3.2.1078-01. 2.3.2. Продовольственное сырье и пищевые продукты. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы» . URL: https://lyceum7rzd.ru/upload/medialibrary/834/SanPiN-2.3.2.1078_01.pdf (дата обращения: 10.05.2025).
- Решение Комиссии таможенного союза ЕЭС от 09.12.2011 № 874 «О принятии технического регламента Таможенного союза «О безопасности зерна» . URL: <https://www.alta.ru/tamdoc/11sr0874/#pr2> (дата обращения: 10.05.2025).
- СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Таблица 4.1. Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве . URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения 10.05.2025).
- Тарасов С. И. Зарубежный опыт экологически безопасного использования бесподстилочного навоза // Техника и технологии в животноводстве. 2020а. № 2. С. 69–79.
- Тарасов С. И. Проблемные аспекты использования побочной продукции животноводства // Техника и технологии в животноводстве. 2020б. № 3. С. 89–97.
- Тарасов С. И., Мёрзлая Г. Е. Использование бесподстилочного навоза. Приоритетные направления исследований. Сообщение 2. Производство бесподстилочного навоза. Актуальные направления исследований // Плодородие. 2018. № 6. С. 53–55. DOI: 10.25680/S19948603.2018.105.17
- Тарасов С. И., Кравченко М. Е., Бужина Т. А. Влияние длительного регулярного применения бесподстилочного навоза на плодородие, экологическую безопасность дерново-подзолистой супесчаной почвы // Техника и технологии в животноводстве. 2020. № 2 (38). С. 90–99.
- Тиво П. Ф. Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами, содержащимися в животноводческих стоках // Мелиорация. 2019. № 1 (87). URL: <https://melio.belal.by/jour/article/viewFile/132/116> (дата обращения: 10.05.2025).
- Шалак И. О. Использование свиного бесподстилочного навоза для оптимизации питания зерновых культур в южной лесостепи Западной Сибири : Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Омск, 2023. 24 с. URL: https://ssaa.ru/science/dissovet_99.2.117.03/2023/SHalak_IO/5-1.pdf.

Благодарности

Автор выражает благодарность кафедре агрохимии и почвоведения Омского государственного аграрного университета им. П. А. Столыпина за предоставленные результаты агрохимических исследований и данные полевых опытов в ООО «РУСКОМ-Агро» 2015–2017 гг.

AGROECOLOGICAL FEATURES OF MERCURY AND ARSENIC BEHAVIOR IN THE SOIL – PLANT SYSTEM AS A RESULT OF THE USE OF ORGANIC FERTILIZERS

KOROLEV
Alexander Nikolaevich

PhD, Siberian State Automobile and Road University (SibADI), 5 Mira Avenue, Omsk, 644080, Russia, Omsk region, korolev66.66@mail.ru

Key words:

mercury
arsenic
meadow-chernozem
soil
liquid organic fertilizer
pig manure
spring wheat

Summary: The improper use of liquid livestock waste as fertilizers can lead to an increase in the content of mobile forms of heavy metals and metalloids in the soil. The purpose of the study is to examine the features of the behavior of Hg and As in the “soil – plant” system and an ecological and agrochemical assessment of the use of a liquid fraction of pig manure as an organic fertilizer. We carried out a field experiment in the subzone of the southern forest-steppe of the Omsk region on meadow-chernozem soil. We studied the effect and two years of aftereffect of organic fertilizer on the yield of a variety of spring soft wheat “In memory of Aziev”, as well as the behavior of mercury and arsenic in the soil-plant system. The predecessor of spring wheat was peas. It was established that the optimal dose of the liquid fraction of pig manure in meadow-chernozem soil for spring wheat was 200 t/ha. Both the action and the aftereffect in this variant resulted in the highest yield increase. However, the introduction of pig manure leads to an increase in the content of Hg and As in the soil both in the year of action and in the coming years of aftereffect. The application of fertilizers at a dose of 300 t/ha per year leads to an increase in the gross mercury content by 1.36 times, and arsenic by 1.1 times. This is accompanied by an increase in the content of these elements in all organs of wheat (root, straw, grain) during the growing season and harvest. The distribution of elements by wheat organs both in the control and in the soil using fertilizer is as follows: roots > straw > grain. The roots are a protective barrier that prevents the entry and accumulation of metals in the generative organs. The removal of elements with grain in the year of action and the next two years of aftereffect does not exceed 0.01 % of their gross content in the soil and 15 % of the amount received with organic fertilizer. It is proposed to calculate the accumulation coefficient of Hg and As, taking into account the entire group of mobile forms of compounds of these elements in the soil.

Received on: 03 August 2025

Published on: 10 December 2025

References

- About the state and environmental protection of the Omsk region in 2009: , Pravitel'stvo Omskoy obl., M-vo sel'skogo hoz-va i prodovol'stviya Omskoy obl.; . Omsk: Omskblankizdat, 2010. 200 p.
- Bezuglova O. S. Okolelova A. A. On the normalization of arsenic content in soils, Zhivye i biokosnye sistemy. 2012. No. 1. URL: <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2012-1-7> (data obrascheniya: 10.05.2025).
- Biological accumulation coefficients as a basis for the biochemical classification of chemical elements, Mezhdisciplinarnyy nauchnyy i prikladnoy zhurnal «Biosfera». 2024. T. 16, No. 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsienty-biologicheskogo-nakopleniya-kak-osnova-biohimicheskoy-klassifikatsii-himicheskikh-elementov/viewer> (data obrascheniya: 10.05.2025).
- Bobrenko I. A. Goman N. V. Kormin V. P. Shalak I. O. The use of pig semiliquid manure to optimize the nutrition of grain crops. Omsk: Izd-vo FGBOU VO Omskiy GAU, 2023. 127 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67781796>
- Bobrenko I. A. Goman N. V. Kormin V. P. Shmidt A. G. The effect of pig manure on potato productivity in meadow-chernozem soil of the southern forest-steppe of the Omsk region, Dostizheniya nauki i tehniki APK. 2019. T. 33, No. 3. P. 23–25.
- Bobrenko I. A. Goman N. V. Kormin V. P. Trubina N. K. The use of pig semiliquid manure in agriculture in the Omsk region: recommendations for production. Omsk: Izd-vo FGBOU VO OmGAU im. P. A. Stolypina, 2021b. 44 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48083300> (data obrascheniya: 10.05.2025).
- Bobrenko I. A. Goman N. V. Trubina N. K. Kormin V. P. Shalak I. O. The use of organic fertilizers based on the

- solid fraction of pig manure in the cultivation of spring wheat, Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021a. No. 1 (41). P. 5–12. DOI: 10.48136/2222-0364_2021_1_5
- Bobrenko I. A. Goman N. V. Trubina N. K. Shmidt A. G. Optimization of the use of pig manure for barley on meadow-chernozem soil of the southern forest-steppe of Western Siberia, Zemledelie. 2018. No. 7. P. 23–25. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10706
- Bobrenko I. A. Shalak I. O. Goman N. V. Trubina N. K. Kormin V. P. The effectiveness of application of pig manure for grain crops, Vestnik Omskogo GAU. 2022. No. 1 (45). P. 13–19. DOI: 10.48136/2222-0364_2022_1_13
- D'yakonov K. N. Kasimov N. S. Tikunov V. S. Modern methods of geographical research. M.: AO «Izdatel'stvo «Prosveschenie», 1996. P. 62–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40347123> (data obrascheniya: 10.05.2025).
- Decision of the Commission of the Customs Union of the EEC dated 09.12.2011 No. 874 «On the adoption of the Technical Regulations of the Customs Union «On grain Safety». URL: <https://www.alta.ru/tamdoc/11sr0874/#pr2> (data obrascheniya: 10.05.2025).
- Dyshko V. N. Modern problems and innovative technologies in agronomy: A course of lectures for masters. Smolensk: FGBOU VO Smolenskaya GSHA, 2023. 118 p.
- GN 2.1.7.2511-09. Hygienic standards. Approximate permissible concentrations (APCs) of chemicals in the soil. M.: Federal'nyy centr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2009. 10 p. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/708/4293828439.pdf> (data obrascheniya: 10.05.2025).
- GOST 17.4.3.06-2020. Nature conservation. Soils. General requirements for the classification of soils by the effect of chemical pollutants on them. M.: Standartinform, 2020. 14 p.
- GOST R 17.4.3.07-2001. Nature conservation. Soils. Requirements for the properties of sewage sludge when used as fertilizers. M.: Standartinform, 2008. 5 p.
- GOST R 53117-2008. Organic fertilizers based on animal husbandry waste. Technical specification. (Aktualiz. 01.07.2023). M.: Standartinform, 2020. 15 p.
- Gladyshev V. P. Chemodynamics and monitoring of mercury in the environment, Materialy Simpoziuma «Kontrol' i reabilitatsiya okruzhayushey sredy», Pod obsch. red. M. V. Kabanova, N. P. Soldatkina. Tomsk: Izd, vo «Spektr» Instituta optiki atmosfery SO RAN, 2000. P. 34–38.
- Guidelines for the determination of heavy metals in farmland soils and crop products. Izd. 2-e, pererab. i dop. M.: CINAQ, 1992. 63 p.
- Kol'ga D. F. Vas'ko A. S. Processing of manure into environmentally friendly organic fertilizers. Minsk: BGATU, 2017. 128 p.
- Komyakova E. M. Antonova O. I. Composition of cattle and pig manure, features of use and prospects of processing, Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020. No. 6 (188). P. 63–68.
- Pogulyay I. O. Nikolaeva D. A. The effect of liquid pig manure on the yield of spring wheat grains in the Omsk region, I regional'naya (zaochnaya) nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodyh uchenyh i obuchayuschihsya, posvyaschennaya 100-letiyu Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Omsk: Izd-vo FGBOU VO Omskiy GAU, 2018. P. 323–327.
- Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 11/14/2001 No. 36 (as amended on 07/06/2011) «On the introduction of Sanitary Rules» (together with «SanPiN 2.3.2.1078-01. 2.3.2. Food raw materials and foodstuffs. Hygienic requirements for food safety and nutritional value. Sanitary and epidemiological rules and regulations». URL: https://lyceum7rzd.ru/upload/medialibrary/834/SanPiN-2.3.2.1078_01.pdf (data obrascheniya: 10.05.2025).
- SanPiN 1.2.3685 is 21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. Table 4.1. Maximum permissible concentrations (MPC) and approximate permissible concentrations (ODCs) of chemicals in the soil. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (data obrascheniya 10.05.2025).
- Shalak I. O. The use of pig semiliquid manure to optimize the nutrition of grain crops in the southern forest-steppe of Western Siberia: Avtoref. dip. ... kand. s, h. nauk. Omsk, 2023. 24 p. URL: https://ssaa.ru/science/dissovet_99.2.117.03/2023/SHalak_IO/5-1.pdf.
- Tarasov S. I. Kravchenko M. E. Buzhina T. A. The effect of long-term regular use of semiliquid manure on the fertility and environmental safety of sod-podzolic sandy-loam soils, Tehnika i tehnologii v zhivotnovodstve. 2020. No. 2 (38). P. 90–99.
- Tarasov S. I. Foreign experience of environmentally safe use of semiliquid manure, Tehnika i tehnologii v zhivotnovodstve. 2020a. No. 2. P. 69–79.
- Tarasov S. I. Problematic aspects of the use of animal by-products, Tehnika i tehnologii v zhivotnovodstve. 2020b. No. 3. P. 89–97.
- Tarasov S. I. The use of semiliquid manure. Priority areas of research. Message 2. Production of semiliquid manure. Current research directions, Plodorodie. 2018. No. 6. P. 53–55. DOI: 10.25680/S19948603.2018.105.17
- The yearbook. Pollution of the soils of the Russian Federation by industrial toxicants in 2010. Obninsk: GU

«VNIIGMI-MCD», 2011.

Tivo P. F. Environmental pollution by heavy metals contained in livestock runoff, Melioraciya. 2019. No. 1 (87). URL: <https://melio.belal.by/jour/article/viewFile/132/116> (data obrascheniya: 10.05.2025).

Vinogradov B. V. Biotic criteria for the allocation of environmental disaster zones in Russia, Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 1993. No. 5. P. 13–27.