

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ РУД В КАЧЕСТВЕ УДОБРЕНИЙ ПРОЛОНГИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ

А.Ф. Сметанников, Горный институт УрО РАН

А.И. Косолапова, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН

Е.М. Митрофанова, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН

Б.А. Бачурин, Горный институт УрО РАН

Д.В. Оносов, Горный институт УрО РАН

Д.С. Фомин, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН

В.Р. Ямалтдинова, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН

Д.Г. Шишков, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН

Е.Ф. Оносова, Горный институт УрО РАН

Представлены результаты использования отходов переработки К-Mg руд в качестве удобрений пролонгированного действия после высокотемпературного обжига. Показаны результаты лабораторных и полевых испытаний эффективности действия этих удобрений (далее – огарков) с разной температурой обжига на зерновых культурах и картофеле. Применение огарков в качестве удобрений обеспечило формирование урожайности яровой пшеницы, ячменя и картофеля на уровне стандартного удобрения – хлористого калия. Прибавка урожая яровой пшеницы по сравнению с контролем составила 1,42–1,78, с фоном 0,23–0,28, ячменя 1,30–2,02; 0,34–0,47 и картофеля 1,44–4,58; 0,54–3,15 соответственно. Качественные показатели продукции (зерно, солома у зерновых, клубни у картофеля) были также на уровне применения стандартного удобрения. Сделан вывод о получении максимального эффекта при использовании огарков с температурой обжига 900°C.

**Ключевые слова:** глинисто-солевые отходы, шламы, огарки, обжиг, удобрения пролонгированного действия, урожайность, яровая пшеница, ячмень, картофель, качество продукции, минеральный состав.

### Введение

Калий является одним из макроэлементов (НРК), необходимых всем растениям. Роль калия в растениях многогранна. Он участвует в фотосинтетической деятельности, углеводном, азотном балансе, опти-

мизации кислотно-щелочного соотношения, повышении водоудерживающей способности листьев, снижении поступления радионуклидов в растения и других важнейших физиологических операциях [3–5]. Поэтому оптимизация калийного пита-

\* Исследования выполнены в рамках проекта «Развитие селекции и семеноводства картофеля в Российской Федерации» Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2025 годы.

ния является актуальной проблемой современного сельского хозяйства.

Основным калийным удобрением в настоящее время является хлористый калий, вызывающий ряд нареканий при его использовании, в первую очередь ввиду негативного влияния хлора. Сотрудниками ГИ УрО РАН разработана технология переработки глинисто-солевых отходов (шламов) ПАО «Уралкалий», которая предусматривает использование продуктов утилизации (огарков) в качестве удобрений пролонгированного действия [7]. В Пермском крае в ПАО «Уралкалий» – ведущем предприятии калийной промышленности – количество глинисто-солевых отходов (шламов) составляет около 60 млн тонн [7].

#### Экспериментальная часть

Глинисто-солевые отходы (шламы) после переработки К-Mg руд содержат много питательных веществ: калий, кальций, магний, в меньшей степени азот, фосфор, а также микроэлементы. Особый интерес представляют халькофильные элементы в форме сульфидов. Важным качеством этих отходов является то, что они содержат 11–12% доломита, 40–50% сульфатов кальция, 15–20% калиевого полевого шпата и имеют нейтральную или щелочную реакцию среды. Источником калия является калиевый полевой шпат (далее КПШ).

Технология переработки шламов включает гидроциклонирование, фильтрацию, сушку, грануляцию материала с влажностью 13–14% и обжиг.

Поскольку первая стадия переработки шламов – это частичное обессоливание (до 15–20% остаточных хлоридов), то в обессоленном продукте происходит отно-

сительное накопление матричных минералов нерастворимого в воде остатка (Н.О.) шламов. Т.е. в грануляте – высушенном и гранулированном продукте, фиксируется состав частично обессоленного шлама. Конечная стадия – обжиг при температуре 600°C – приводит к твердофазному преобразованию гранулята и формированию новообразованных минералов. Основным элементом предлагаемой технологии является высокотемпературный окислительно-восстановительный (хлорирующий) обжиг в интервале температур 600–800–900°C. Нижний интервал температуры выбран по причине полного отжига при этой температуре органических экополютантов, присутствующих в шламах в виде остаточных технологических реагентов. В то же время при этой температуре начинаются твердофазные преобразования с формированием минеральных новообразований. Верхний интервал температуры при обжиге способствует максимальному преобразованию исходного состава шлама. В табл. 1 показан минеральный состав огарка в трех интервалах температуры обжига.

Как видно из табличных данных, наиболее устойчивыми минералами при повышении температуры обжига являются кварц, КПШ и гематит; наименее устойчивыми – доломит, галит, сильвин и ангидрит. Особое значение имеет формирование сингенита  $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$  водного сульфата калия и кальция. Растворимость сингенита в почвах больше чем КПШ, но несравнимо меньше чем хлоридов калия и натрия. Базой для формирования этого минерала являются сильвин, галит и ангидрит. Т.е. минеральный материал обожженного шлама характеризуется «уходом» хлора и формированием новых калиевых и

Таблица 1

Минеральный состав огарков с температурой обжига 600\*, 800\*\* и 900°C\*\*\*, масс. %

Номер пробы	Минеральный состав (прибл. вес. %)									
	кварц	КПШ	доломит	галит	сильвин	ангидрит	гематит	пироксен	сингенит	слюда
1*	10	18	8	5	4	44	2	13		1
3**	9	15	5	3	4	40	2	19	2	1
5***	8	13	2	1	2	18	2	43	8	

Примечание: анализ выполнен на дифрактометре SHIMADZUXRD-6000. Расчет содержания минеральных составляющих проведен методом Петера-Кальмана.

кальциевых минералов путем твердофазного преобразования за счет неустойчивых к высокой температуре минералов.

Таким образом, оптимальный режим обжига приводит к перераспределению калия в новообразованных минералах с низкой растворимостью и на бесхлорной основе.

Результаты опытов по изучению эффективности применения продукта переработки глинисто-солевых отходов калийной промышленности (огарка), в качестве удобрения пролонгированного действия, на яровой пшенице, ячмене и картофеле свидетельствуют, что наибольший эффект достигнут с использованием продукта утилизации огарка с температурой обжига 900°C.

Анализ таблицы показывает, что именно при этой температуре самый высокий баланс калиевых минералов в огарке (КПШ и сингенит). Следует вывод, что максимальная температура обжига должна составлять 900±50°C.

Немаловажным является то обстоятельство, что поступление калия в почву, учитывая низкую растворимость этих двух минералов, низкая (соответственно КПШ наиболее труднорастворим, сингенит – менее), Следовательно, низкие дозы огарка неэффективны, но при внесении оптимальных доз можно прогнозировать действие одной дозы на 4–8 лет. В этом явлении заключается смысл понятия «пролонгированного действия».

В сезон 2017 года использовались дозы огарка из расчета 60, 90, 120 кг/га.

В 2015–2017 гг. были проведены лабораторные и полевые опыты на дерново-сильнопodzолистой тяжелосуглинистой почве (рН<sub>кcl</sub> – 5,2–5,4; гумус – 2,21–2,30%, сумма поглощенных оснований – 19,6–22,0 мг/экв. на 100 г почвы; подвижный фосфор – 121–124, обменный калий – 110–120 мг/кг почвы). Схема опыта представлена в таблицах.

Агротехника в опыте – общепринятая для возделывания яровой пшеницы, ячменя и картофеля в Пермском крае. Учет урожая сплошной поделяночный. Стати-

стическая обработка полученных данных выполнена по методике Б.А. Доспехова [1]. Качественный состав зерна, соломы зерновых культур и клубней картофеля проводили по общепринятым методикам в изложении В.В. Кирина [2].

### Результаты исследований

Для установления эффективности огарка разной степени обжига были включены наряду с контролем варианты: фон – NP и NPK с хлористым калием.

Метеорологические условия в годы проведения опыта были различны.

Вегетационный период 2015 г. характеризовался благоприятными условиями для формирования урожайности зерновых культур, а 2016 г. – как засушливый, с высокой теплообеспеченностью и недостаточным количеством осадков, 2017 г. отличался низкой теплообеспеченностью и большим количеством осадков.

Урожайность яровой пшеницы в среднем за два года составила 1,68 т/га, ячменя – 2,04 т/га (табл. 2). Внесение азотно-фосфорных удобрений способствовало повышению продуктивности яровой пшеницы по сравнению с контролем на 89%, ячменя – на 76%. Стандартное калийное удобрение (хлористый калий) в рекомендуемой дозе для зерновых культур 60 кг/га д.в. на фоне азотно-фосфорных удобрений повысило урожайность на 117% по сравнению с контролем и фоном на 15–17% соответственно.

Применение отходов калийной промышленности способствовало формированию урожайности зерновых культур на уровне стандартного удобрения KCl. Прибавка урожая яровой пшеницы по сравнению с контролем составила 1,42–1,78 т/га с фоном 0,23–0,28 т/га, ячменя – 1,30–2,02 и 0,34–0,47 т/га соответственно.

Внесение низких доз калийных удобрений было неэффективным ввиду необходимости содержания обменного (доступного) для растений калия.

Таким образом, применение отходов калийной промышленности под зерновые культуры в рекомендуемой дозе в качест-

Таблица 2

Влияние отходов калийной промышленности на урожайность яровой пшеницы, ячменя, т/га.

Варианты	Яровая пшеница					Ячмень				
	Урожайность, т/га	прибавка				Урожайность, т/га	прибавка			
		к контролю		к фону			к контролю		к фону	
		т/га	%	т/га	%		т/га	%	т/га	%
Без удобрений – контроль	1,68	-	-	-	-	2,04	-	-	-	-
Фон – N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	3,18	1,50	89	-	-	3,59	1,55	76	-	-
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>ккл30</sub>	3,30	1,62	96	0,12	4	3,83	1,79	88	0,24	7
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>ккл60</sub>	3,65	1,97	117	0,47	15	4,21	2,17	106	0,62	17
Фон+0-1 <sub>30</sub>	3,18	1,50	89	-	-	3,34	1,30	64	-	-
Фон+0-3 <sub>30</sub>	3,10	1,42	84	-	-	3,38	1,34	66	-	-
Фон+0-1 <sub>60</sub>	3,46	1,78	106	0,28	9	4,06	2,02	99	0,47	13
Фон+0-3 <sub>60</sub>	3,41	1,73	103	0,23	7	3,93	1,89	93	0,34	9
НСР <sub>05</sub>		0,21					0,38			

ве удобрения является эффективным приемом, так как повышается урожайность зерновых культур, не ухудшается качество продукции и решается экологическая проблема – их утилизация.

Анализ качества полученной продукции показал, что содержание азота, фосфора и калия в зерне и соломе обеих культур было на уровне варианта с применением стандартного удобрения KCl в действующей дозе и достоверно выше по сравнению с контролем.

У обеих культур независимо от варианта опыта содержание азота выше в зерне, а калия – в соломе. Применение отходов калийной промышленности не ухудшало качества продукции по сравнению со стандартным удобрением – хлористым калием, внесенным в рекомендуемой дозе.

Недостаток тепла и избыток влаги в течение вегетационного периода отрицательно сказался на формировании урожайности картофеля, который на контроле составил 2,92 т/га (табл. 3). Фракционный состав урожая показал, что в основном в структуре урожая преобладала мелкая фракция. Совсем отсутствовала фракция клубней больше 80–100 г.

Внесение минеральных удобрений азотно-фосфорных (фоновый вариант) и полного минерального удобрения (NPK) в рекомендуемой дозе способствовало повышению урожайности клубней картофеля на 1,43–4,51 т/га соответственно за счет крупной фракции по сравнению с контролем. Внесение нетрадиционных калийных удобрений – огарков в составе полного минерального удобрения в реко-

Таблица 3

Урожайность и качественные показатели клубней картофеля

Варианты	Урожайность, т/га	Прибавка				Содержание		
		к контролю		к фону		сухое в-во, %	крахмал, %	нитраты мг/кг
		т/га	%	т/га	%			
Без удобрений – контроль	2,92	-	-	-	-	18,9	13,6	13,2
Фон – N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	4,35	1,43	49	-	-	18,6	13,9	14,0
N <sub>90</sub> P <sub>90</sub> K <sub>ккл 90</sub>	7,43	4,51	154	3,08	71	19,1	13,8	18,1
Фон+0-1 <sub>60</sub>	4,36	1,44	49	0,01	-	18,8	13,6	13,1
Фон+0-1 <sub>90</sub>	6,41	3,49	119	2,06	47	18,7	11,6	16,9
Фон+0-1 <sub>120</sub>	7,07	4,15	142	2,72	62	19,2	15,0	17,6
Фон+0-2 <sub>60</sub>	4,89	1,97	67	0,54	12	19,1	13,5	15,0
Фон+0-2 <sub>90</sub>	6,88	3,96	136	2,53	58	18,5	11,4	17,5
Фон+0-2 <sub>120</sub>	6,99	4,07	139	2,64	61	18,7	11,6	17,8
Фон+0-3 <sub>60</sub>	5,15	2,23	76	0,80	18	19,1	11,5	16,0
Фон+0-3 <sub>90</sub>	7,37	4,45	152	3,02	69	19,1	14,4	17,2
Фон+0-3 <sub>120</sub>	7,50	4,58	157	3,15	72	19,2	14,1	17,4
НСР <sub>05</sub>		0,88				F <sub>ф</sub> <F <sub>теор</sub>	F <sub>ф</sub> <F <sub>теор</sub>	3,2

мендуемой и повышенной дозах было на уровне традиционного удобрения – хлористого калия. Увеличение урожайности отмечено за счет крупных фракций по сравнению с контролем. Внесение нетрадиционных калийных удобрений – огарков в составе полного минерального удобрения в рекомендуемой и повышенной дозе было на уровне традиционного удобрения – хлористого калия. Увеличение урожайности отмечено за счет формирования крупных фракций.

Определение качества клубней (содержания сухого вещества, крахмала, нитратов) показало, что внесение огарков независимо от их дозы не ухудшает качественные показатели продукции по сравнению с традиционным удобрением – хлористым калием.

### Выводы

1. Результаты опытов по изучению эффективности применения продукта утилизации глинисто-солевых отходов калийной промышленности (огарков) в качестве удобрения пролонгированного действия на яровой пшенице, ячмене и картофеле свидетельствуют, что наибольший эффект достигнут с использованием

продукта утилизации огарка с температурой обжига 900°C.

Именно при этой температуре самый высокий баланс калиевых минералов в огарке (КПШ и сингенита). Следует вывод, что максимальная температура обжига должна составлять 900±50°C.

2. Применение отходов калийной промышленности в рекомендуемых дозах под зерновые культуры и картофель является эффективным приемом, повышающим урожайность яровой пшеницы на 1,73–1,78, ячменя – на 1,89–2,02, картофеля – на 3,49–4,58 т/га по сравнению с контролем.

3. Внесение огарков способствовало формированию урожайности яровой пшеницы, ячменя и картофеля на уровне стандартного удобрения – хлористого калия – не ухудшало элементный состав зерна и соломы зерновых культур. Содержание сухого вещества и крахмала в клубнях картофеля было также на уровне стандартного калийного удобрения.

4. Использование обожженных глинисто-солевых отходов в качестве удобрений пролонгированного действия позволяет утилизировать их и решить экологическую проблему.

### Библиографический список

1. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
2. Кидин В.В., Дерюгин И.П., Кобзаренко В.И. [и др.]. Практикум по агрохимии / под ред. В.В. Кидина. – М.: Колос, 2008. – 599 с.
3. Митрофанова Е.М., Косолапова А.И. Содержание обменного калия в дерново-подзолистых почвах Предуралья при известковании // Плодородие. – 2010. – № 5. – С. 26–28.
4. Никитина Л.В., Володарская И.В. Динамика обменного калия и его минимальные уровни в агроценозах на дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. – 2007. – № 2. – С. 14–18.
5. Никитищен В.И., Личко В.И. Поведение калия в системе почва – растение при различных условиях водного режима // Агрохимия. – 2007. – № 1. – С. 17–24.
6. Сметанников А.Ф., Оносов Д.В., Синегрибов В.А., Косолапова А.И., Новиков П.Ю. Патент РФ № 2497961 «Способ переработки отходов калийного производства» (зарегистрирован 10.11.2013 г.).
7. Сметанников А.Ф., Оносов Д.В., Синегрибов В.А., Новиков, П.Ю., Косолапова А.И. Утилизация отходов переработки К-Mg руд // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья: Материалы междунар. конф. – Томск, 2013. – С. 445–448.
8. Ashley M.K., Grant M., Grabov A. Plant responses to potassium deficiencies: a role for potassium transport proteins // Exp. Bot. – 2006. – Vol. 57. – P. 426–436.
9. Szezerba M.W., Britto D.T., Kronzucker I.J. K<sup>+</sup> transport in plants: physiology and molecular biology // Journal of Plant Physiology. – 2009. – Vol. 166. – P. 447–466.

TEST RESULTS OF WASTE PROCESSING POTASSIUM-MAGNESIUM ORES,  
AS A FERTILIZER OF PROLONGED ACTION

A.F. Smetannikov<sup>1</sup>, A.I. Kosolapova<sup>2</sup>, E.M. Mitrofanova<sup>2</sup>, B.A. Bachurin<sup>1</sup>,  
D.W. Onosov<sup>1</sup>, D.S. Fomin<sup>2</sup>, V.R. Yamaltdinova<sup>2</sup>, D.G. Shishkov<sup>2</sup>, E.F. Onosova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mining Institute UB RAS

<sup>2</sup> Perm Federal Research Center UB RAS

The results of using K-Mg ore processing wastes as long-life fertilizers after high-temperature roasting are presented. The results of laboratory and field tests of the effectiveness of the action of these fertilizers (hereinafter cinder) with a different temperature of roasting on cereals and potatoes are shown. The use of cinders as fertilizers ensured the formation of yields of spring wheat, barley and potatoes at the level of standard fertilizer – potassium chloride. The increment of spring wheat yield in comparison with the control was 1.42–1.78, with a background of 0.23–0.28, barley 1.30–2.02; 0,34–0,47 and potatoes 1,44–4,58; 0.54–3.15, respectively. Quality indicators of products (grain, straw from cereals, tubers from potatoes) were also at the level of the application of a standard fertilizer. The conclusion is made about obtaining the maximum effect when using cinders with a firing temperature of 900°C.

*Keywords:* clay-salt waste, sludge, cinders, burning, fertilizer of prolonged action, yield, spring wheat, barley, potatoes, product quality, mineral composition.

**Сведения об авторах**

*Сметанников Андрей Филиппович*, доктор геолого-минералогических наук, заведующий сектором технологической минералогии, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (ГИ УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: smetannikov@bk.ru

*Косолапова Антонина Ильинична*, доктор сельскохозяйственных наук, заведующая отделом агрохимии и земледелия, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН (ПФИЦ УрО РАН), 614900, г. Пермь, ул. Ленина, 13А; e-mail: pniish@rambler.ru

*Митрофанова Екатерина Михайловна*, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, ПФИЦ УрО РАН; e-mail: pniish@rambler.ru

*Бачурин Борис Александрович*, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоэкологии горнодобывающих регионов, ГИ УрО РАН; e-mail: bba@mi-perm.ru

*Оносов Дмитрий Валентинович*, инженер, ГИ УрО РАН; e-mail: onosov@list.ru

*Фомин Денис Станиславович*, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией земледелия и агрохимии, ПФИЦ УрО РАН; e-mail: pniish@rambler.ru

*Ямалтдинова Венера Рафхатовна*, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, ПФИЦ УрО РАН; e-mail: pniish@rambler.ru

*Шишков Даниил Глебович*, младший научный сотрудник, ПФИЦ УрО РАН; e-mail: pniish@rambler.ru

*Оносова Екатерина Филипповна*, техник-лаборант, стационар ГИ УрО РАН, 618404, Пермский край, г. Березники, ул. Ленина, 12А; e-mail: ekaterinaonosova@bk.ru

*Материал поступил в редакцию 29.11.2017 г.*