

Перспективы использования хвостов обогащения фосфоритов в качестве удобрений для органического земледелия

© 2020. Н. В. Сырчина^{1,2}, к. х. н., доцент, с. н. с.,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
Н. Н. Богатырёва¹, аспирант, Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., н. с.,

¹Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Органическое земледелие и производство органических продуктов ориентировано на использование натуральных экологически безопасных удобрений и средств защиты растений, позволяющих получить экологически чистую продукцию и предотвратить загрязнение окружающей среды. К числу таких удобрений можно отнести хвосты обогащения (эфеля) Верхнекамского фосфоритного рудника. Основными агрохимически ценными компонентами эфелей являются фосфориты мелких фракций, глауконит и известковые материалы. Для выполнения исследований на территории хвостохранилища было отобрано 28 образцов эфеля. В результате исследований установлено, что среднее содержание (%) P_2O_5 в образцах составляет $7,9 \pm 1,7$; K_2O – $3,1 \pm 0,7$; железа (в пересчёте на Fe_2O_3) – $11,2 \pm 2,5$. Содержание Cd не превышает 0,2 мг/кг. Методом магнитной сепарации эфеля были разделены на магнитную и немагнитную фракции. Установлено, что доля магнитной фракции в разных образцах варьирует в широких пределах и в среднем составляет 68%. Основным компонентом магнитной фракции является глауконит. В состав немагнитной фракции преимущественно входят фосфатные материалы, карбонаты, кварц. Сrostки разных минералов попадают в обе фракции. Распределение элементов по отдельным фракциям неравномерно. В магнитной фракции концентрируются U, Th, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb. Содержание токсичных и радиоактивных элементов в эфеле умеренное или низкое и не представляет опасности для окружающей среды. Относительно высокое содержание таких микроэлементов, как Se, Zn, Co, увеличивает агрохимическую ценность эфелей. Химический состав хвостов обогащения фосфоритных руд Верхнекамского фосфоритного рудника позволяет позиционировать их как перспективное сырьё для переработки в натуральные фосфорно-калийные удобрения с микроэлементами для органического земледелия.

Ключевые слова: удобрения, органическое земледелие, натуральные фосфорные удобрения, фосфориты, глаукониты, Вятско-Камское месторождение, химический состав фосфоритов.

Prospects for using phosphate rock enrichment tailings as fertilizers for organic farming

© 2020 N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760, T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047,
N. N. Bogatyryova¹ ORCID: 0000-0002-6028-6632, G. Ya. Kantor^{1,2} ORCID: 0000-0002-6462-6702

¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Institute of Biology of Komi Science Center of the Ural Branch of RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktvkar, Komi Republic, Russia, 167982,

e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Organic farming and the production of organic products is focused on the use of natural environmentally friendly fertilizers and plant protection products, which allows obtaining high quality and safe products and prevent environmental pollution. Such fertilizers include the fine-grained tailings (ephels) of the Verkhnekamsk phosphorite mine. The main agrochemically valuable components of ephels are phosphorites of small fractions, glauconite and calcareous materials. To carry out research on the territory of the tailing dump, 28 samples of ephel were selected. As a result of studies, it was found that the average content (%) of P_2O_5 in the samples is 7.9 ± 1.7 ; K_2O – 3.1 ± 0.7 ; iron (in terms of Fe_2O_3) – 11.2 ± 2.5 . The content of Cd does not exceed 0.2 mg/kg. By the method of magnetic separation, ephels were divided into magnetic and non-magnetic fractions. It was found that the share of the magnetic fraction in different samples varies widely and averages 68%. The main component of the magnetic fraction is glauconite. The non-magnetic fraction mainly includes

phosphate materials, carbonates, quartz. Splices of different minerals fall into both fractions. The distribution of elements in individual fractions is uneven. Iron, potassium and elements such as Y, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cs, Se are concentrated in the magnetic fraction but U, Th, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb are concentrated in the non-magnetic fraction. The content of toxic and radioactive elements in the ephel is moderate or low and does not pose a threat to the environment. The relatively high content of trace elements such as Se, Zn, Co, increases the agrochemical value of ephels. The chemical composition of the tailings of phosphate ore processing at the Verkhnekamsk phosphate mine allows them to be positioned as a promising raw material for processing into natural phosphorus-potassium fertilizers with trace elements for organic farming.

Keywords: fertilizers, organic farming, natural phosphorus fertilizers, phosphorites, glauconites, Vyatka-Kama deposit of phosphorites, chemical composition of phosphorites.

Важнейшим фактором устойчивого развития сельского хозяйства в современных условиях является ориентация на экологически чистые производственные системы. К таким системам относится органическое земледелие (ОЗ) [1, 2]. Внедрение ОЗ имеет не только экологические, но и экономические аспекты. По имеющимся оценкам, ускоренное развитие органического производства позволит значительно расширить экспортный потенциал России [3]. С 1 января 2020 г. в РФ вступает в силу Федеральный закон № 280-ФЗ от 03.08.2018 «Об органической продукции и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Данный закон существенно ограничивает перечень агрохимикатов, которые могут быть использованы при производстве органических продуктов. В соответствии с ГОСТ 33980-2016, в качестве фосфорных удобрений в ОЗ разрешено применение только природных фосфатов, алюминиево-кальциевого фосфата и томас-шлака. При этом содержание кадмия (Cd) в удобрениях не должно превышать 90 мг/кг P_2O_5 . Традиционные фосфорные удобрения, получаемые методом химической переработки фосфатного сырья, в список удобрений для ОЗ не входят. Из всех разрешённых в ОЗ фосфорных удобрений наибольшее практическое значение имеют фосфориты, характеризующиеся низким содержанием Cd. Особое внимание к содержанию Cd обусловлено высокой токсичностью соответствующего элемента. Международное агентство по исследованию рака (МАИР) относит Cd к канцерогенам 1 класса [4]. Повышенное поступление Cd в организм приводит к поражению мочеполовой и опорно-двигательной систем, нарушению репродуктивных функций и другим серьёзным заболеваниям [5]. В 2016 г. Еврокомиссия (European Commission) предложила ввести ограничения на содержание Cd в фосфорных удобрениях до 60 мг/кг с последующим снижением этого показателя до 40 мг/кг (через три года) и до 20 мг/кг (через 12 лет) [6]. Наиболее высокое содержание Cd (до

500 мг/кг и более) характерно для фосфоритов, добываемых на территории США, Марокко, Перу, Того, Туниса, Сенегала [7]. Российские фосфориты характеризуются низким содержанием Cd, что допускает их применение в ОЗ и расширяет экспортный потенциал.

Агрохимическая ценность фосфоритов определяется не только наличием в их составе соединений фосфора (P_2O_5), но и сопутствующими компонентами (карбонаты, глауконит, микроэлементы), однако, до настоящего времени качество фосфатного сырья в основном рассматривалось с точки зрения перспектив его химической переработки. Производство органических продуктов требует иного подхода, ориентированного на сохранение окружающей среды от загрязнения, деградации и истощения.

Большой интерес для ОЗ в качестве натуральных фосфорных удобрений могут представлять фосфориты крупнейшего в РФ Вятско-Камского месторождения. В настоящее время добыча руды на месторождении не производится, однако в период активного освоения месторождения на территории Верхнекамского фосфоритного рудника были накоплены миллионы тонн хвостов обогащения (эфелей), основными компонентами которых являются фосфориты мелких фракций и кварцево-глауконитовые пески.

Цель настоящей работы состояла в оценке возможности и перспектив применения эфелей Верхнекамского фосфоритного рудника в качестве удобрения для органического земледелия.

Объекты и методы

Объектом исследования явились хвосты обогащения фосфоритовых руд Вятско-Камского месторождения. Соответствующие руды преимущественно представлены желваковыми фосфоритами, сгруженными в кварцево-глауконитовых песках [8]. Содержание P_2O_5 в желваках обычно варьирует в пределах 12–33%. Единственным пред-

приятием, занимающимся добычей, обогащением и переработкой фосфоритов на месторождении, был Верхнекамский фосфоритовый рудник (пос. Рудничный Верхнекамского района Кировской области). Добыча и переработка руды осуществлялась в течение 70 лет. Руда при обогащении разделялась на концентрат, используемый для производства фосфоритной муки, и хвосты обогащения, которые складировались на территории хвостохранилища. Хвостохранилище, действующее в посёлке Рудничном до 1980 г, к настоящему времени рекультивировано и застроено. С 1980 по 2002 гг. эфеля сбрасывались в новое (действующее) хвостохранилище [9]. Объём хвостов, накопленных за этот период, превысил 20 млн т. Основными компонентами эфелей являются глауконит, фосфориты мелких фракций, кварцевый песок, известковые

и глинистые материалы [10]. Непосредственный интерес для практического применения в агрохимии представляют фосфориты, глаукониты и известковые компоненты. Кварцевый песок и глины не имеют агрохимической ценности. К вредным примесям относятся соединения железа, токсичные элементы и естественные радионуклиды.

Отбор образцов эфеля для проведения исследований осуществлялся на территории действующего хвостохранилища. Всего было отобрано и проанализировано 28 образцов. Пробы отбирались с глубины от 0 до 10 метров. Исследования проводились в лабораторных условиях. Растительные остатки из отобранных образцов удалялись. Подготовка проб и их анализ выполнялись в соответствии с методами, приведёнными в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Методы исследования эфелей / Methods of researching tails of enrichment of phosphorites

Показатель Indicator	Метод исследования Research method	Принцип метода Principle of method
Влажность (в том числе гигроскопическая), % Humidity (including hygroscopic), %	ГОСТ 5180-2015	Высушивание подготовленной пробы массой 20 г до постоянной массы при температуре 105±2 °С
Насыпная плотность, г/см ³ Bulk density, g/cm ³	ГОСТ 32721-2014	Взвешивание подготовленной пробы эфеля в мерном сосуде
Содержание P ₂ O ₅ , % Content of P ₂ O ₅ , %	ГОСТ 24024.9-81	Экстракция монофосфатов из пробы эфеля в виде фосфорномолибденового аммония смесью органических растворителей с последующим фотометрическим измерением оптической плотности фосфорномолибденовой сини при длине волны 630 нм
Содержание магнитной фракции, % Content of magnetic fraction, %	Магнитная сепарация	Выделение магнитной фракции с помощью неодимовых магнитов с остаточной магнитной индукцией 1,25–1,28 Тесла
Содержание глинистой фракции, % Content of clay fraction, %	ГОСТ 8735-88	Отмучивание частиц крупностью до 0,05 мм из навески эфеля с последующим высушиванием остатка до постоянной массы и взвешиванием
Содержание карбонатов, % Content of carbonates, %	ГОСТ 34467-2018	Разрушение грунта соляной кислотой до постоянной массы
Минералогический состав Mineralogical composition	Петрографический анализ	Микроскопическое исследование состава эфеля с идентификацией минералов на основании морфологических признаков. Рентгенофазный анализ.
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг The specific effective activity of natural radionuclides, Bq/kg	ГОСТ 30108-94	С помощью портативного многофункционального сцинтилляционного гамма-спектрометра МКС-АТ6101Д
Элементный состав Elemental composition	Методика НСАМ 499-ЭАС/МС «Определение элементного состава горных пород, почв, грунтов и донных отложений атомно-эмиссионными и масс-спектральными методами анализа»	

Результаты и обсуждение

В результате исследований было установлено, что основными компонентами эфелей являются глауконит, кварц, фосфат и глинистые материалы. В небольшом количестве присутствуют кальцит, сидерит, гипс, барит, магнетит. Глинистая фракция представлена глауконитом и гидрослюдами типа иллита и шилкинита. Фосфатный материал представлен фторкарбонатапатитами (по составу приближается к франколиту $\text{Ca}_{10}[\text{PO}_4]_6(\text{F}_2, [\text{OH}]_2, \text{CO}_3, \text{O})$). Соотношение компонентов в эфелях, складированных на разных участках хвостохранилища, варьирует в широких пределах. На рисунке 1а (см. цветную вкладку) приведена фотография типичного образца эфеля, сделанная с помощью стереоскопического микроскопа. На фотографии хорошо видны зелёные зёрна глауконита и бесцветные, желтоватые или серые зёрна других минералов. Большинство зёрен покрыто вкраплениями гидроксидов железа бурого цвета.

Характерной особенностью глауконитов является значительное содержание железа, что обуславливает их высокую парамагнитность. Удельная магнитная восприимчивость глауконита составляет $63 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$, удельная магнитная восприимчивость фосфорита – $4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$, кварца – $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ [11]. Существенная разница в магнитной восприимчивости позволяет выделять глауконит из эфеля с помощью магнитной сепарации. На рисунке 1 приведены микрофотографии магнитной (1б) и немагнитной (1с) фракций эфеля, выделенных с помощью неодимовых магнитов. Из 28 проанализированных проб, только в двух не удалось выделить магнитную фракцию (МФ). В остальных пробах содержание МФ варьировало от 52 до 81% и в среднем составило 68%. Основным компонентом МФ является глауконит. Сrostки глауконита с другими минералами могут попасть в обе фракции (рис. 2).

Наиболее ценными компонентами эфелей являются фосфор и калий. Согласно полученным данным, среднее содержание P_2O_5 в эфеле находится на уровне $7,9 \pm 1,7\%$. В двух пробах содержание P_2O_5 достигало 10,3–10,5%. В немагнитной фракции (НМФ) массовая доля P_2O_5 варьировала от 13,4 до 22,5% и в среднем составила $17,1 \pm 3,4\%$. В МФ содержание P_2O_5 находилось на уровне $5,5 \pm 0,5\%$. Массовая доля K_2O в эфеле в среднем составила $3,1 \pm 0,7\%$, причём в МФ содержание K_2O было в 3 раза выше, чем в НМФ.

Среднее содержание карбонатов (в пересчёте на CaCO_3) в эфеле находилось на уровне $3,8 \pm 0,9\%$. В НМФ этот показатель достигал 18,5% при среднем содержании $11,3 \pm 4,7\%$. С точки зрения кислотной переработки фосфатного сырья, карбонаты оцениваются как вредные примеси, однако, при использовании эфелей в качестве самостоятельных удобрений, наличие карбонатов можно рассматривать как определённое преимущество, позволяющее снизить кислотность почвы. В кислых почвах фосфаты быстро связываются полуторными оксидами в недоступные для растений соединения. Вносимые с эфелем карбонаты способствуют снижению кислотности и увеличению биодоступности фосфора [12].

Массовая доля глинистой фракции в различных пробах эфеля варьировала от 8 до 40%. В процессе магнитной сепарации основная доля глинистых включений переходила в магнитную фракцию. Очистка эфеля от глинистых частиц позволяла повысить содержание P_2O_5 в очищенном продукте.

Среднее содержание железа (в пересчёте на Fe_2O_3) в эфеле достигало $11,2 \pm 2,5\%$, при этом в МФ данный показатель повышался до 16,8–17,2%, а в НМФ снижался до 1,8–5,2%.

Большое значение для выявления перспектив использования фосфоритов в ОЗ имеет их микроэлементный состав [13–15]. Однако, согласно данным НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.И. Сысина, для экологической оценки фосфатного сырья и фосфорных удобрений достаточно осуществлять их контроль по следующим 16 компонентам: F, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Sr, V, Cr, Pb, Hg, Co, Cd, U, Th, Y, при этом наибольший вклад в экологическую опасность сырья вносят F, As, Sr, Hg, Cd, U, Y [16]. В таблице 2 приведены данные о среднем содержании соответствующих элементов в эфеле и распределении этих элементов по фракциям.

Содержание фтора в отобранных образцах находилось в пределах $1,9 \pm 0,1\%$, при этом в добываемых в настоящее время фосфоритах массовая доля F достигает 3–4% [17]. Распределение F по фракциям было относительно равномерным.

Согласно полученным данным (табл. 2), в МФ концентрируются такие элементы, как V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Cs, Se. В НМФ – Sr, Ba, Mo, Cd, Pb и радиоактивные Th и U, причём содержание U в НМФ более, чем в 3 раза превышает содержание этого элемента в МФ и достигает 22,1 г/т, что, тем не менее, значительно ниже среднего содержания U в фосфо-

Таблица 2 / Table 2

Содержание экологически значимых элементов в хвостах обогащения
The content of environmentally significant elements in tailings

Элемент Element	Содержание элемента, мкг/г / Element content, µg/g		
	эфель ephel	немагнитная фракция non-magnetic fraction	магнитная фракция magnetic fraction
V	114,5±20,5	53,5±10,2	128,0±12,5
Cr	161,0±14,1	55,2±8,1	196,0±9,4
Co	75,6±1,5	47,5±1,1	95,4±1,6
Ni	78,3±8,4	42,4±6,2	97,4±7,8
Cu	6,3±0,5	5,1±0,5	7,1±0,3
Zn	107,5±3,5	62,1±2,8	131,0±3,4
As	31,8±4,2	33,4±6,4	25,0±2,4
Se	3,6±0,2	3,2±0,2	4,3±0,4
Y	165,5±8,1	139,0±9,3	186,0±7,5
Cs	2,9±0,2	1,6±0,2	3,8±0,3
Sr	534,5±106,8	1144±189	341±43
Mo	1,6±0,2	2,0±0,2	1,5±0,2
Cd	0,16±0,03	0,25±0,04	0,16±0,03
Ba	250,0±39,6	504,0±40,6	190,0±21,7
Hg	Ниже предела обнаружения / Below detection limit		
Pb	14,5±1,1	19,5±0,9	13,9±1,1
Th	12,4±1,1	19,9±2,1	11,3±2,2
U	10,2±1,6	22,1±1,8	6,7±1,5

ритах осадочного происхождения (75 г/т [17]). Для осадочных фосфоритов вообще характерно повышенное содержание Th и U. Удельная эффективная активность естественных радионуклидов в фосфоритах, используемых для производства удобрений, может достигать 1200 Бк/кг. Для верхнекамских эфелей этот показатель значительно ниже и не превышает 277 Бк/кг. Таким образом, с точки зрения загрязнения окружающей среды и сельскохозяйственной продукции радиоактивными элементами, верхнекамские фосфориты опасности не представляют.

Для фосфатного сырья отечественных месторождений характерно повышенное содержание Mn, Ni, As, Sr, Pb, Co. В частности, для глауконитовых и желваковых фосфоритов с повышенным содержанием железа типичны высокие концентрации As (до 40 300 мг/кг), Co и Ni (до 40 мг/кг) [19]. Согласно результатам выполненных исследований, по содержанию As верхнекамские эфеля можно считать благополучным сырьём.

Большое значение для характеристики экологической безопасности удобрений имеет содержание Pb. Согласно ГН 2.1.7.2041-06, валовое содержание Pb в почве не должно превышать 32 мг/кг. Содержание Pb в эфелях ниже допустимого для почв уровня более чем в 2 раза. Содержание в эфеле Hg, V

и Mn, также существенно ниже установленных соответствующими нормативами значений. Содержание валового Ni в почвах не нормируется, однако избыток этого элемента приводит к хлорозу, обусловленному недостатком железа. Выявленное содержание Ni в эфелях несколько ниже среднего содержания этого элемента (90 мг/кг) в традиционных минеральных удобрениях [20]. Высокое содержание Ni в почвах наблюдается при внесении этого элемента в дозе более 23 кг/га [21]. Для достижения соответствующего показателя потребуется внести более 300 т эфеля на гектар пашни. Содержание в эфеле Cr, Co, Cu, Zn, Mo относительно невелико, кроме того, эти элементы необходимы для нормального развития растений и почвенной микрофлоры и их наличие можно отнести к преимуществам эфеля как удобрения.

Особый интерес представляет значительное содержание в эфеле Se, что характерно для некоторых фосфатсодержащих пород [22]. В настоящее время проблема дефицита Se в почвах привлекает всё большее внимание учёных. По имеющимся данным, до 90% населения РФ потребляет недостаточное количество этого элемента, что отражается на здоровье и продолжительности жизни [23]. Выраженный дефицит Se характерен для многих территорий РФ (в том числе для Кировской об-

ласти). Содержание Se в эфелях значительно превосходит содержание этого элемента в селенодефицитных почвах. Таким образом, эфеля могут применяться в качестве натуральных селен-содержащих удобрений.

Заключение

В результате выполненных исследований установлено, что химический состав хвостов обогащения Верхнекамского фосфоритного рудника позволяет использовать их в качестве самостоятельного фосфорно-калийного удобрения для органического земледелия. Наиболее рациональным способом переработки эфелей может стать разделение их на НМФ и МФ с последующим использованием НМФ в качестве натурального фосфорного удобрения (типа фосфоритной муки) или в качестве компонента минеральных или органоминеральных удобрений. К ценным свойствам НМФ можно отнести относительно высокое содержание P_2O_5 , низкое содержание токсичных элементов (в частности Cd), наличие примеси глауконита (мелиорант, источник калия и микроэлементов, сорбент тяжёлых металлов). Удобрения на основе эфелей можно позиционировать как источники ценных для питания растений микроэлементов: Mo, Co, Zn, Se. К преимуществам эфелей можно отнести экологическую безопасность, благоприятный элементный состав, низкую себестоимость, соответствие производства удобрений принципам «зелёной» химии.

Литература

1. Bello W.B. Problems and prospect of organic farming in developing countries // *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*. 2008. V. 1. No. 1. P. 36–43.
2. Rigby D., Caceres D. Organic farming and the sustainability of agricultural systems // *Agricultural Systems*. 2001. No. 68. P. 21–40.
3. Харитонов Н.С., Хожаинов Н.Т. Развитие органического сельского хозяйства как фактор роста экспортного потенциала агропромышленного комплекса России // *Никоновские чтения*. 2017. № 22. С. 253–258.
4. Lugon-Moulin N., Ryan L., Donini P., Rossi L. Cadmium content of phosphate fertilizers used for tobacco production // *Agronomy for Sustainable Development*. 2006. V. 26. No. 3. P. 151–155.
5. Han J., Shang Q., Du Y. Review: effect of environmental cadmium pollution on human health // *Health*. 2009. No. 3. P. 159–166.
6. Annexes to the Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council. European Commission. Brussels, 17.3.2016. [Электронный ресурс] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=&uri=CELEX:52016PC0157> (Дата обращения: 21.10.2019).
7. Mar S.S., Masanori O. Investigation of Cd contents in several phosphate rocks used for the production of fertilizer // *Microchemical Journal*. 2012. No. 104. P. 17–21.
8. Дубейковский С.Г. О границе юрской и меловой систем в пределах Вятско-Камской впадины // *Вопросы геологии Южного Урала и Поволжья*. 1969. Вып. 5. Ч. 1. С. 100–113.
9. Дружинин Г.В. Геологический отчёт «Материалы оценки прогнозных ресурсов хвостов обогащения (эфелей) Верхнекамского фосфоритного рудника. Пояснительная записка». Киров: ФБУ «ТФГИ по Приволжскому Федеральному округу», 2017. 14 с.
10. Рубцов Ю.С., Абрамичев Н.А. Отчёт по работе «Изучение вещественного состава и технологических свойств конкреционных фосфоритовых руд Вятско-Камского месторождения Кировской области в связи с переориентацией их использования на кислотную переработку» 1981–1983 гг. Киров: ФБУ «ТФГИ по Приволжскому Федеральному округу». 160 с.
11. Можейко Ф.Ф., Поткина Т.Н., Гончарик И.И., Шевчук В.В. Влияние обжига на физико-химические свойства основных рудообразующих минералов фосфоритов // *Весці нацыянальнай акадэміі навук беларусі. Сeryя хімічных навук*. 2012. № 1. С. 107–112.
12. Haynes R. J. Effects of liming on phosphate availability in acid soils // *Plant and Soil*. 1982. V. 68. P. 289–308.
13. Bech J., Reverter F., Tume P., Sanchez-Algarra P., Delgado R., Suarez M., Lansac A., Roca N. Selenium and other trace element in phosphorites: A comparison between those of the Bayovar-Sechura and other provenances // *Journal of Geochemical Exploration*. 2010. V. 107. No. 2. P. 146–160.
14. Al-Hwaiti M., Matheis G., Saffarini G. Mobilization, redistribution and bioavailability of potentially toxic elements in Shidiya phosphorites // *Southeast Jordan. Env Geol*. 2005. No. 47. P. 431–444.
15. Khater A. Uranium and heavy metals in Phosphate Fertilizers // *Uranium, Mining and Hydrogeology*. 2008. No. 9. P. 193–198.
16. Киперман Ю.А., Скоробогатов В.И., Антонец Т.А., Казақ В.Г., Ангелов А.И. Эколого-геохимическая оценка агрономических руд и продуктов их переработки // *ГИАБ*. 1995. № 1. С. 44–48.
17. Denzinger H.F.J., Konig H.J., Kruger G.E.W. Fluorine recovery in the fertilizer industry – A review // *Phosphor. Potassium*. 1979. V. 103. P. 33–39.
18. Baturin G.N., Kochenov A.V. Uranium in Phosphorites // *Lithology and Mineral Resources*. 2001. No. 36. P. 303–321.
19. Янин Е.П. Источники и пути поступления тяжёлых металлов в реки сельскохозяйственных районов // *Экологическая экспертиза*. 2004. № 4. С. 67–90.
20. Gambus F., Wiczorek J. Pollution of fertilizers with heavy metals // *Ecological Chemistry and Engineering*. A. 2012. V. 19. No. 4–5. P. 353–360.

21. Андриенко Л.Н., Аксенова Ю.В. Влияние внесения кадмия, никеля, цинка на уровень содержания их в почве, урожайность и качество корнеплодов овощных культур // Земледелие. 2018. № 8. С. 23–25.

22. Bech J., Suarez M., Reverter F., Tume P., Sanchez-Algarra P., Bech J., Lansac. A. Selenium and other trace elements in phosphate rock of Bayovar–Sechura (Peru) // Journal of Geochemical Exploration. 2010. V. 107. No. 2. P. 136–145.

23. Аристархов А.Н., Бусыгин А.С., Яковлева Т.А. Дефицит селена в почвах и растениях Северо-Восточного Нечерноземья как индикатор необходимости применения селеновых удобрений // Международный сельскохозяйственный журнал. 2018. № 1. С. 31–36.

References

1. Bello W.B. Problems and prospect of organic farming in developing countries // Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management. 2008. V. 1. No. 1. P. 36–43.

2. Rigby D., Caceres D. Organic farming and the sustainability of agricultural systems // Agricultural Systems. 2001. No. 68. P. 21–40.

3. Kharitonov N.S., Khozhainov N.T. The development of organic agriculture as a factor in the growth of export potential of the agricultural sector of Russia // Nikonovskiye chteniya. 2017. No. 22. P. 253–258 (in Russian).

4. Lugon-Moulin N., Ryan L., Donini P., Rossi L. Cadmium content of phosphate fertilizers used for tobacco production // Agronomy for Sustainable Development. 2006. V. 26. No. 3. P. 151–155. doi: 10.1051/agro:2006010

5. Han J., Shang Q., Du Y. Review: effect of environmental cadmium pollution on human health // Health. 2009. No. 3. P. 159–166. doi: 10.4236/health.2009.13026

6. Annexes to the Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council. European Commission. Brussels, 17.3.2016. [Internet resource] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=&uri=CELEX:52016PC0157> (Accessed: 21.10.2019).

7. Mar S.S., Masanori O. Investigation of Cd contents in several phosphate rocks used for the production of fertilizer // Microchemical Journal. 2012. No. 104. P. 17–21 (in Russian). doi: 10.1016/j.microc.2012.03.020

8. Dubeykovsky S.G. About the border of the Jurassic and Cretaceous systems within the Vyatka-Kama depression // Voprosy geologii Yuzhnogo Urala i Povolzh'ya. 1969. Issue 5. Part 1. P. 100–113 (in Russian).

9. Druzhinin G.V. Geological report Materials for assessing the estimated resources of enrichment tailings (ephels) of the Verkhnekamsk phosphorite mine. Explanatory Note. Kirov: FBU “TFGI for the Volga Federal District”, 2017. 14 p. (in Russian).

10. Rubtsov Yu.S., Abramychev N.A. Report on the work “Study of the material composition and technological properties of nodule phosphorite ores of the Vyatka-Kama deposit in the Kirov region in connection with the reorien-

tation of their use to acid processing” 1981–1983. Kirov: Federal State Budgetary Institution “TFGI for the Volga Federal District”. 160 p. (in Russian).

11. Mozheiko F.F., Potkina T.N., Goncharik I.I., Shevchuk V.V. The effect of firing on the physicochemical properties of the main ore-forming minerals of phosphorites // Vestsi natsyyanalnay akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk. 2012. No. 1. P. 107–112 (in Russian).

12. Haynes R. J. Effects of liming on phosphate availability in acid soils // Plant and Soil. 1982. V. 68. P. 289–308.

13. Bech J., Reverter F., Tume P., Sanchez-Algarra P., Delgado R., Suarez M., Lansac A., Roca N. Selenium and other trace element in phosphorites: A comparison between those of the Bayovar-Sechura and other provenances // Journal of Geochemical Exploration. 2010. V. 107. No. 2. P. 146–160. doi: 10.1016/j.gexplo.2010.04.002

14. Al-Hwaiti M., Matheis G., Saffarini G. Mobilization, redistribution and bioavailability of potentially toxic elements in Shidiya phosphorites // Southeast Jordan. Env Geol. 2005. No. 47. P. 431–444. doi: 10.1007/s00254-004-1173-2

15. Khater A. Uranium and heavy metals in Phosphate Fertilizers // Uranium, Mining and Hydrogeology. 2008. No. 9. P. 193–198. doi: 10.1007/978-3-540-87746-2_26

16. Kiperman Yu.A., Skorobogatov V.I., Antonets T.A., Kazak V.G., Angelov A.I. Ecological and geochemical assessment of agronomic ores and products of their processing // GIAB. 1995. No. 1. P. 44–48 (in Russian).

17. Denzinger H.F.J., Konig H.J., Kruger G.E.W. Fluorine recovery in the fertilizer industry – A review // Phosphor. Potassium. 1979. V. 103. P. 33–39.

18. Baturin G. N., Kochenov A. V. Uranium in Phosphorites // Lithology and Mineral Resources. 2001. No. 36. P. 303–321.

19. Yanin E.P. Sources and routes of heavy metals entering rivers of agricultural regions // Ekologicheskaya ekspertiza. 2004. No. 4. P. 67–90 (in Russian).

20. Gambus F., Wiczorek J. Pollution of fertilizers with heavy metals // Ecological Chemistry and Engineering. A. 2012. V. 19. No. 4–5. P. 353–360. doi: 10.2428/ecea.2012.19(04)036

21. Andrienko L.N., Aksenova Yu.V. The effect of application cadmium, nickel, zinc on the level of their content in the soil, yield and quality of root of vegetable crops // Zemledelie. 2018. No. 8. P. 23–25 (in Russian). doi: 10.24411/0044-3913-2018-10807

22. Bech J., Suarez M., Reverter F., Tume P., Sanchez-Algarra P., Bech J., Lansac. A. Selenium and other trace elements in phosphate rock of Bayovar–Sechura (Peru) // Journal of Geochemical Exploration. 2010. V. 107. No. 2. P. 136–145. doi: 10.1016/j.gexplo.2009.08.004

23. Aristarkhov A.N., Busygin A.S., Yakovleva T.A. Selenium deficiency in soils and plants of the North-Eastern Non-Black Earth Region as an indicator of the need for selenium fertilizers // Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal. 2018. No. 1. P. 31–36 (in Russian). doi: 10.24411/2587-6740-2018-11008

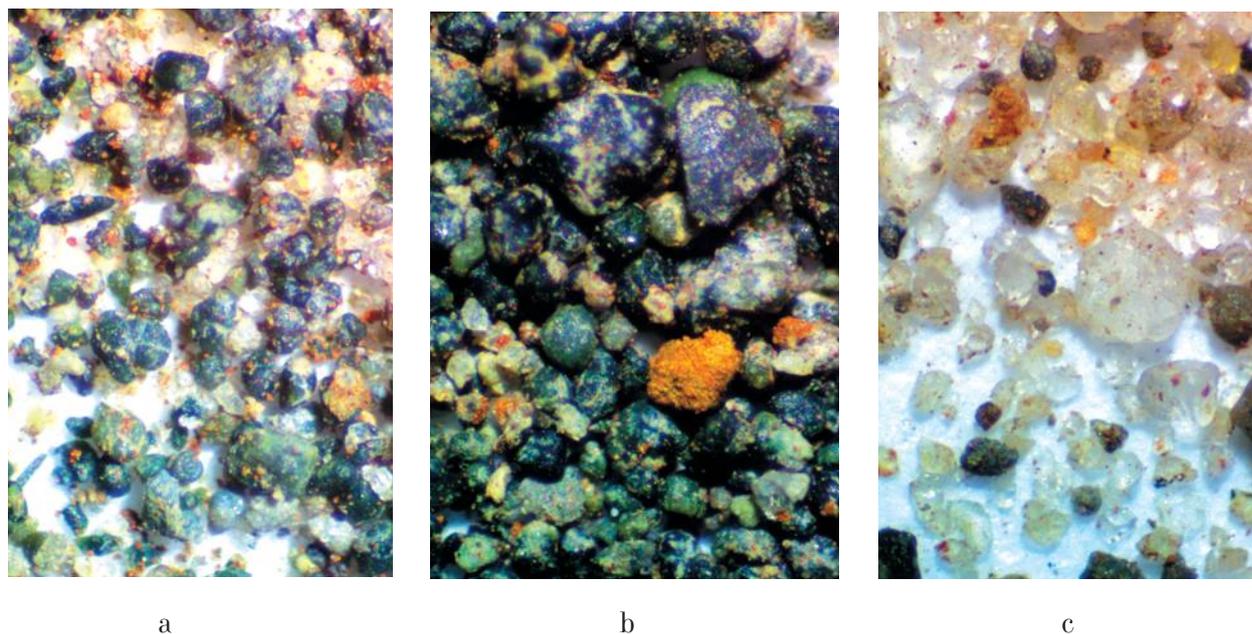


Рис. 1. Микрофотографии образцов, сделанные с помощью стереоскопического микроскопа МСП-1 вариант 22 (увеличение x20): а – эфель; б – магнитная фракция эфеля; с – немагнитная фракция эфеля
Fig. 1. Microphotographs of samples taken using a stereoscopic microscope MSP-1 option 22 (magnification x20): a – ephel; b is the magnetic fraction of the ephel; c – non-magnetic fraction of the ephel



Рис. 2. Микрофотография сростков разных минералов, входящих в состав эфеля, сделанная с помощью стереоскопического микроскопа МСП-1 вариант 22 (увеличение x20)
Fig. 2. A microphotograph of the intergrowths of various minerals that make up the ephel, made using a stereoscopic microscope MSP-1 option 22 (magnification x20)