

UDC 631.841.8

**Filon V. V., Dr. Sci (Agric.), Professor,
Akopyan A. A., Assistant**

*Kharkiv National Agrarian University named after. V. V. Dokuchaev,
Kharkiv, Ukraine, e-mail: filonvasiv@gmail.com*

AGRONOMIC AND ECONOMIC ESTIMATION OF APPLICATION OF SAFE AMIACA IN THE CONDITIONS OF THE LEFT-BEARING FOREST OF UKRAINE

The estimation of agronomic and economic feasibility of using anhydrous ammonia as nitrogen fertilizer is given. The conclusion is made that the use of anhydrous ammonia in grain crops provides good profit at a high profitability level. Especially good reaction to the introduction of anhydrous ammonia corn. Net profit at the same time amounted to 5878.22 UAH/ha, profitability level – 139 %. However, it has been shown that the use of anhydrous ammonia inevitably leads to a deterioration of the structural state of typical chernozem. The authors give a brief overview of the literature on the use of computer tomography (CT). The tomographic sections of the monoliths, which were selected in the tapes with the introduction of ammonia, are presented. On tomograms, dispersion and disaggregation of the soil mass, loss of an agronomically valuable soil structure are clearly diagnosed. It was emphasized that negative changes in the physical condition of the soil are recorded six months after the introduction of ammonia. In order to restore the original soil properties, it is proposed to alternate the addition of anhydrous ammonia with solid nitrogenous tukas.

We have carried out research on the economic and agronomic feasibility of the use of anhydrous ammonia in typical black limes of the Livoberezhny Forest-steppe of Ukraine (village Okoye Novovodolazhsky district of the Kharkiv region).

Field production experiment is based on winter wheat and corn. The area of the plot is 200m², the repetition is three times. A variety of winter wheat – "Luxurious", a hybrid of corn – "Pioneer 9041". The dose of nitrogen under winter wheat was 120 kg, for corn – 1 Scanning of monoliths indicates a negative change in the structural state of chernozems typical under the influence of the introduction of anhydrous ammonia. Thus, at the cut of the monolith from the control variant (Fig.), Structural separations and aggregates of higher orders, rather large intergranular pores, pore-cracks and pores of biogenic origin are clearly visible. The monogram tomogram from the variant where ammonia was introduced indicates a significant consolidation of the soil. Intergranular pores are present in insignificant quantities, in some samples they are practically absent. Recorded crack fracture, soil shivering. Thus, the use of anhydrous ammonia is an effective and, at the same time, an environmentally hazardous measure that obliges farmers to carry out operational monitoring of soil parameters that are adversely affected by this fertilizer. Taking into account the fact that these changes of soils mainly cover cells with the introduction of ammonia, to

restore their original properties should be alternated with the introduction of liquid and solid nitrogen fertilizers 70 kg d.r.

Application of anhydrous ammonia under winter wheat and maize on typical black earths of the Livoberezhny Forest-steppe of Ukraine provides for obtaining from 2976.46 to 5878.22 UAH/hectare of net profit at a profitability level of 112-139 %. The study involving computer tomography shows the dispersion of soil mass and the loss of an agronomically valuable soil structure in ammonia banding. The specified soil changes are clearly recorded within six months.

Key words: chernozem typical, anhydrous ammonia, computer tomography.

УДК 631.841.8

**Филон В. В., д-р с.-х. наук, профессор,
Акопян А. А., ассистент**

*Харьковский национальный аграрный университет им. В. В. Докучаева,
г. Харьков, Украина, e-mail: filonvasiv@gmail.com*

АГРОНОМИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ БЕЗВОДНОГО АММИАКА В УСЛОВИЯХ ЛЕВОБЕРЕЖНОЙ ЛЕСОСТЕПИ УКРАИНЫ

Дана оценка агрономической и экономической целесообразности использования безводного аммиака в качестве азотного удобрения. Сделан вывод о том, что применение безводного аммиака под зерновые культуры обеспечивает хорошую прибыль при высоком уровне рентабельности. Особенно хорошо реагирует на внесение безводного аммиака кукуруза. Чистая прибыль при этом составила 5878,22 грн/га, уровень рентабельности – 139%. Вместе с тем показано, что применение безводного аммиака неизбежно ведет к ухудшению структурного состояния черноземов типичных. Авторами приведен краткий обзор литературы по использованию в почвоведении компьютерной томографии (КТ). Представлены томографические срезы монолитов, которые были отобраны в лентах с внесением аммиака. На томограммах четко диагностируется диспергация и дезагрегация почвенной массы, потеря агрономически ценной структуры почвы. Подчеркнуто, что негативные изменения физического состояния почв регистрируются через шесть месяцев после внесения аммиака. С целью восстановления исходных свойств почвы предлагается чередовать внесение безводного аммиака с твердыми азотными туками.

Ключевые слова: чернозем типичный, безводный аммиак, компьютерная томография.

УДК 631.841.8

Філон В. В., д-р с.-г. наук, професор,**Акопян А. А., асистент***Харківський національний аграрний університет ім. В. В. Докучаєва,
м. Харків, Україна, e-mail: filonvasiv@gmail.com*

АГРОНОМІЧНА ТА ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗВОДНОГО АМІАКУ В УМОВАХ ЛІВОБЕРЕЖНОГО ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

Надано оцінку агрономічної та економічної доцільності використання безводного аміаку як азотного добрива. Зроблено висновок про те, що застосування безводного аміаку під зернові культури забезпечує гарний прибуток за умов високого рівня рентабельності. Особливо добре реагує на внесення безводного аміаку кукурудза. Чистий прибуток при цьому становив 5878,22 грн/га, рівень рентабельності – 139%. Разом з тим показано, що застосування безводного аміаку неминуче веде до погіршення структурного стану чорноземів типових. Авторами наведено стислий огляд літератури з використання у ґрунтознавстві комп'ютерної томографії (КТ). Представлено томографічні зрізи монолітів, що були відібрані у стрічках з внесенням аміаку. На томограмах чітко діагностується диспергація і дезагрегація ґрунтової маси, втрата агрономічно цінної структури ґрунту. Підкреслено, що негативні зміни фізичного стану ґрунтів реєструються через шість місяців після внесення аміаку. З метою відновлення вихідних властивостей ґрунту пропонується чергувати внесення безводного аміаку з твердими азотними туками.

Ключові слова: чорнозем типовий, безводний аміак, комп'ютерна томографія.

Вступ. Безводний аміак є одним із перспективних добрив, навколо якого йдуть постійні дискусії. На сьогодні найбільший обсяг зрідженого аміаку використовують у США (Мірошніченко М. М. та ін., 2015; Ревтьє А. В., 2016), де частка безводного аміаку становить близько 50% від внесених азотних добрив. Другу весну переживає внесення аміаку і в Україні. Перш за все це пов'язано з наявністю аміакопроводу «Гольяті - Одеса», який проходить по території Харківської, Запорізької, Донецької, Дніпропетровської, Херсонської, Миколаївської і Одеської областей. Аміакопровід має 12 роздавальних станцій, що забезпечує обслуговування значної кількості господарств. Разом з тим не слід приховувати й те, що головною причиною широкого застосування аміаку як за кордоном, так і в Україні є економіка, а точніше, прибуток від його використання. Прості розрахунки показують, що вартість азоту в разі внесення його під озиму пшеницю в дозі 150 кг/га становить для аміачної селітри 4552,02 грн (за вартості її 10500 грн/т), для аміаку – 2460,51 грн (за вартістю його 13500 грн/т).

За близької вартості на внесення добрив, загальні витрати, пов'язані з внесенням аміачної селітри, становитимуть – 4852,02 грн/га, безводного аміаку – 2960,51 грн/га. Безумовно, що в результаті цього сільгоспвиробник буде віддавати перевагу останньому.

Об'єкт і методи досліджень. Проведено дослідження з економічної та агрономічної доцільності застосування безводного аміаку на чорноземах типових Лівобережного Лісостепу України (с. Охоче Нововодолазького району Харківської області). Польовий виробничий дослід закладено з озимою пшеницею і кукурудзою. Площа ділянки – 200м², повторність трихкратна. Сорт озимої пшениці – «Розкішна», гібрид кукурудзи – «Pioneer 9041». Доза азоту під озиму пшеницю становила 120 кг, під кукурудзу – 170 кг д.р.

Результати дослідження. У таблиці надано результати розрахунків економічної ефективності застосування безводного аміаку під озиму пшеницю і кукурудзу. Дані свідчать, що врожайність зернових культур у 2017 р. становила близько 5 т/га, що значно нижче запланованої (8-10 т/га). Це пояснюється погодними умовами року. Весна була затяжною і прохолодною, що явно гальмувало розвиток кукурудзи. Високі температури і посуха в літній період не дозволили реалізувати генетичний потенціал обраного сорту і гібриду, проте окупність азотних добрив була близькою до нормативної. Чистий прибуток від застосування безводного аміаку під озиму пшеницю у 2017 р. становив 2976,46 грн/га за рівня рентабельності 112 %. Дещо вищий прибуток від застосування безводного аміаку отримано в разі внесення його під кукурудзу – 3224,92 грн/га.

1. Економічна ефективність застосування безводного аміаку під озиму пшеницю і кукурудзу

Культура	Урожайність, ц/га	Приріст урожаю, ц/га	Вартість приросту врожаю, грн/га	Витрати на збирання врожаю, грн/га	Вартість добрив, грн/га	Витрати на внесення добрив, грн/га	Всього витрат, грн/га	Чистий прибуток, грн/га	Рівень рентабельності, %
2017 р.									
Озима пшениця	50,2	11,6	5621,46	484,00	1711,00	450,00	2645,00	2976,46	112
Кукурудза	54,5	16,4	7056,92	963,00	2419,00	450,00	3832,00	3224,92	84
2018 р.									
Озима пшениця	55,0	11,4	6031,74	528,00	1957,50	500,00	2985,50	3046,24	102
Кукурудза	88,1	19,2	10110,72	965,00	2767,50	500,00	4232,50	5878,22	139

Щодо нижчого рівня рентабельності (84 %), то це пов'язано не тільки зі зростанням вартості добрив, але значною мірою з високими витратами на збирання врожаю. Кліматичні умови 2018 р. були більш сприятливими для вирощування культур, у будь-якому випадку у першій половині вегетації.

Урожайність озимої пшениці на удобрених ділянках становила 5,5 т/га, кукурудзи – 8,81 т/га. Це зайвий раз свідчить про те, що кукурудза гарно реагує на внесення безводного аміаку. Чистий прибуток від застосування останнього під кукурудзу становив 5878,22 грн/га за рівня рентабельності – 139 %. Саме цей факт спонукає виробників застосовувати безводний аміак.

Щодо збереження родючості ґрунтів, то у цьому відношенні навряд чи безводний аміак можна вважати екологічнобезпечним добривом. Наші попередні дослідження (Філон В. І., 2011) свідчать про те, що безпосередня дія мінеральних добрив у першу чергу проявляється на структурному і гумусовому стані ґрунтів. Для переконливих доказів негативного впливу безводного аміаку на структурний стан ґрунтів потрібно залучення сучасних інструментальних методів досліджень. Огляд спеціальної літератури свідчить, що комп'ютерна томографія (КТ) на сьогодні є одним із сучасних та об'єктивних методів дослідження ґрунтів у непорушеному стані. Вона дозволяє отримати дані не тільки про розміри структурних агрегатів, але й про форму та взаємне їх розміщення (De Gryze S. et al., 2006; Gibson J. R. et al., 2006; Martinez F. S. J. et al., 2010). На п'ятій конференції з томографії ґрунтів (2018) зазначалося, що КТ на відміну від мікроморфології демонструє конфігурацію порового простору, надає об'ємне зображення розгалуження кореневої системи, віддзеркалює міграційні шляхи ґрунтової мезофауни тощо. Про це свідчать дослідження більшості вчених (Філон В. І., 2004; Герке К. М. и др., 2010; Корост Д. В. и др., 2010). Доведено, що КТ дозволяє отримувати об'єктивні дані з щільності ґрунту та вмісту в ньому вологи (Pires L. F. et al., 2010; Rogasik H. et al., 1999). Можна стверджувати, що на сьогодні існують усі підстави для використання КТ для реєстрації агрогенних змін ґрунтів. Так, Udawatta R., Anderson S. H (2008), а дещо пізніше Kim H. M., Anderson S. H., Motavelli P. P. (2010) на підставі томографічних зрізів показали вплив сільськогосподарського використання ґрунтів на структуру їх порового простору. Tippkötter R. (2009) дослідив водні властивості ґрунтів, а Sander T. (2008) показав зміни ґрунтів під впливом зрошення. Pires L. F., Vacchi O. S., Reichardt K. (2004) досить вдало використали КТ з метою вивчення циклів зволоження на структурний стан ґрунтів. Нам відомо також залучення КТ для досліджень за текстурними змінами ґрунтів (Petth S. et al., 2010), а також за змінами їх об'ємної щільності у часі (Pires L. F. et al., 2010). У спеціальній літературі можна знайти повідомлення про використання КТ з метою оцінки мас переносу в межах гуртового профілю (Goldstein L. et al., 2007, Pedrotti A. et al., 2003), а також про дослідження органічної частини ґрунту (Peth S. et al., 2008). Сподіваємося, що поява нанотомографії дозволить найближчим часом перейти до більш детального дослідження елементарних ґрунтових процесів. Можна і надалі розширювати коло задач, які на сьогодні можна вирішувати за допомогою КТ. Моноліти для комп'ютерної томографії відібрали через шість місяців після внесення NH_3 . Місце проходження аплікатора реєстрували шляхом векторного визначення

електропровідності (COND) ґрунту за допомогою приладу EZODO – 7200. Проведені дослідження свідчать, що у стрічках з внесенням безводного аміаку спостерігається суттєве зростання електропровідності ґрунту, яке в умовах посушливого літа зберігалось протягом тривалого часу. Експрес визначення дисперсності ґрунту за О.Н. Соколовським вказує на інтенсивну диспергацію ґрунтової маси у межах внесення аміаку.

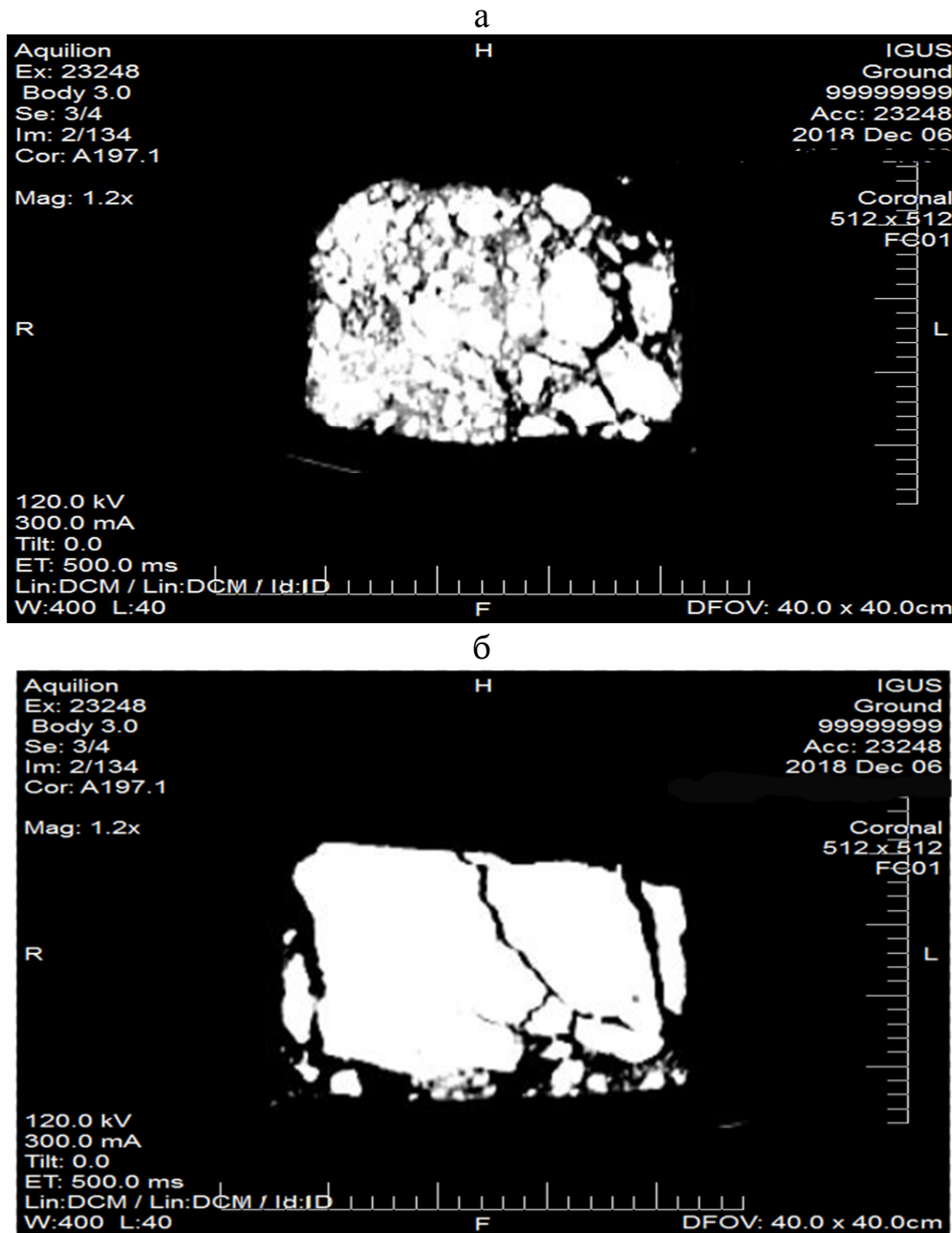


Рисунок. Томографічні зрізи монолітів чорнозему типового:
а – контроль; б – стрічка з внесенням безводного аміаку

Сканування монолітів вказує на негативні зміни структурного стану чорноземів типових під впливом внесення безводного аміаку. Так, на зрізі моноліту з контрольного варіанта (рисунок) чітко видно структурні

відокремлення і агрегати вищих порядків, досить великі міжагрегатні пори, пори-тріщини і пори біогенного походження. Томограма моноліту з варіанта, де вносили аміак, вказує на суттєве ущільнення ґрунту. Міжагрегатні пори присутні в незначній кількості, на окремих зразках вони практично відсутні. Реєструються тріщини усихання, брилистість ґрунту. Отже, застосування безводного аміаку є ефективним і разом з тим екологонебезпечним заходом, що зобов'язує аграріїв здійснювати оперативний контроль за параметрами ґрунту, які зазнають небажаного впливу з боку вказаного добрива. Ураховуючи той факт, що вказані зміни ґрунтів охоплюють головним чином осередки з внесенням аміаку, для відновлення їхніх вихідних властивостей слід чередувати внесення рідких і твердих азотних добрив.

Висновки. Застосування безводного аміаку під озиму пшеницю і кукурудзу на чорноземах типових Лівобережного Лісостепу України забезпечує отримання від 2976,46 до 5878,22 грн/га чистого прибутку за рівня рентабельності 112-139 %. Дослідження із залученням комп'ютерної томографії свідчить про диспергацію ґрунтової маси і втрату агрономічно цінної структури ґрунту в стрічках з внесенням аміаку. Указані зміни ґрунтів чітко реєструються протягом шести місяців.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Мірошниченко М. М., Гладкіх Є. Ю., Ревтьє А. В., Галушка С. В. Еколого-економічне обґрунтування застосування безводного аміаку у землеробстві. (наукові рекомендації). Харків: Видавництво PrintHouse, 2015. 52 с.

Ревтьє А. В. Зміна властивостей чорнозему опідзоленого середньосуглинкового під дією безводного аміаку: автореф. дис. ... канд. с.-г. наук. Харків, 2016. 21 с.

Філон В. І. Діагностика і екологобезпечне спрямування трансформації ґрунтів при внесенні добрив: автореф. дис. ... д-ра с.-г. наук. Харків, 2011. 44 с.

De Gryze S., Jassonge L., Six J. Pore structure changes during decomposition of fresh residue: X-ray tomography analysis. *Geoderma*. 2006. V. 134. P. 82–96.

Gibson J. R., Lin H., Bruns M. A. A comparison of fractal analytical methods on 2- and 3-dimensional computed tomographic scans of soil aggregates. *Geoderma*. 2006. V. 134. P. 335–348.

Martinez F. S. J. Martin M. A., Caniego F. J., Tuller M. Multifractal analysis of discretized X-ray CT images for the characterization of soil macropore structures. *Geoderma*. 2010. V. 156. P. 32–42.

Філон В. І. Можливості використання рентгенівської комп'ютерної томографії для встановлення змін агрофізичного стану чорноземів під впливом добрив. *Вісник аграрної науки*. 2004. № 1. С. 19–21.

Gerke K. M., Saydl R. K., Turumtaev S. B. Impact of preferred pathways in the vertical moisture transfer in the aeration zone: an experimental study. *Geoecology*. 2010. № 5. P. 422–432.

Korost D. V., Kalmukov G. A., Yapaskryt V. O., Ivanov M. K. The application of computer microtomography for studying the structure of clastic reservoirs. *Oil and Gas Geology*. 2010. № 2. P. 36–42.

Pires L. F., Borges J. A. R., Bacchi O. O. S., Reichardt K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: F literature review of Brazilian contribution. *Soil and Tillage Research*. 2010. V. 110. P. 197–210.

Rogasik H., Crawford J. W., Wendroth O., Young I. M., Joschko M. & Ritz K. Discrimination of soil phases by dual energy X-ray tomography. *Soil Science of America J.* 1999. V. 63. P. 741–751.

Udawatta R., Anderson S. H. CT-measured pore characteristics of surface and subsurface soils

influenced by agroforestry and grass buffers. *Geoderma*. 2008. V. 145. P. 381–389.

Kim H. M., Anderson S. H., Motavalli P. P., Gantzer C. J. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. *Geoderma*. 2010. V. 160. P. 244–251.

Tippkötter R., Eickhorst T., Taubner H., Gredner B., Rademaker G. Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocuss X-ray tube computerized tomography (μ CT). *Soil and Tillage Research*. 2009. V. 105. P. 12–20.

Sander T., Gerke H. H., Rogasik H. Assessment of Chinese paddy-soil structure using X-ray computed tomography. *Geoderma*. 2008. V. 145. P. 303–314.

Pires L. F., Arthur R. C. J., Correchel V., Bacchi O. O. S., Reichardt K. The use of gamma ray computed tomography to investigate soil compaction due to core sampling devices. *Braz. J. Phys.* 2004. V. 34. P. 728–731.

Petth S., Nellesen J., Fischer G., Horn R. Non-invasive 3D analysis of local soil deformation under mechanical and hydraulic stresses by μ CT and digital image correlation. *Soil and Tillage Research*. 2010. V. 111. P. 3–18.

Pires L. F., Borges J. A. R., Bacchi O. O. S., Reichardt K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: F literature review of Brazilian contribution. *Soil and Tillage Research*. 2010. V. 110. P. 197–210.

Goldstein L., Prasher S. O., Ghoshal S. Three-dimensional visualization of non-aqueous phase liquid volumes in natural porous media using a medical X-ray computed tomography scanner. *Contaminant hydrology*. 2007. V. 93. P. 96–100.

Pedrotti A., Pauletto E. A., Crestana S., Cruvinel P. E., Vaz P. E., Naime J. M., Silva A. M. Planosol soil sample size for computerized tomography measurement of physical parameters. *Sci. Agric.* 2003. V. 60. P. 735–740.

Peth S., Horn R., Beckmann F., Donath T., Fischer J., Smucker A. J. M. Threedimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based micromorphology. *Soil Science Society of America J.* 2008. V. 72. P. 897–907.

Sleutel S., Cnudde V., Masschaele B., Vlassenbroek J., Dierick M., van Hoorebeke L., Jacobs P., de Neve S. Comparison of different nano- and micro-focus X-ray computed tomography set-ups for the visualization of the soil microstructure and soil organic matter. *Computer and Geosciences*. 2008. P. 931–938.

Schrader S., Rogasik H., Onasch I., Jegou D. Assessment of soil structural differentiation around earthworm burrows by means of X-ray tomography and scanning electron microscopy. *Geoderma*. 2007. V. 137. P. 378–387.

REFERENCES

Miroshnichenko, M. M., Gladkikh, Ye. Yu., Revt'ye, A. V., Galushka, S. V. (2015). Ekologo-ekonomichne obruntuvannya zastosuvannya bezvodnogo amiaku u zemlerobstvi. [Ecological and economic justification of the use of anhydrous ammonia in agriculture]. Kharkiv: PrintHouse. (in Ukrainian).

Revt'є, A. V. (2016). Zmina vlastivostey chornozemu opidzolenogo seredn'osuglinkovogo pid dieyu bezvodnogo amiaku [Changing the properties of chernozem of podzolized medium grizzly under the influence of anhydrous ammonia]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kharkiv. (in Ukrainian).

Filon V. I. (2011). Diagnostika i ekologobezpechne spryamuvannya transformatsii rruntiv pri vnesenni dobriv [Diagnostics and ecologically safe direction of soil transformation during fertilization]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kharkiv. (in Ukrainian).

De Gryze, S., Jassonge, L., Six, J., Bossuyt, H., Wevers, M. and Merckx, R. (2006). Pore structure changes during decomposition of fresh residue: X-ray tomography analysis. *Geoderma*, 134, 82–96.

Gibson, J. R., Lin, H., Bruns, M. A. (2006). A comparison of fractal analytical methods on 2- and 3-dimensional computed tomographic scans of soil aggregates. *Geoderma*, 134, 335–348.

Martinez, F. S. J., Martin, M. A., Caniego, F. J., Tuller, M. (2010). Multifractal analysis of discretized X-ray CT images for the characterization of soil macropore structures. *Geoderma*, 156, 32–

42.

Filon, V. I. (2004). Mozhlyvosti vykorystannya renthenivs'koyi komp'yuternoyi tomohrafiyi dlya vstanovlennya zmin ahrofizychnoho stanu chornozemiv pid vplyvom dobryv [Possibilities of using X-ray computer tomography to determine changes in the agrophysical state of chernozems under the influence of fertilizers]. *Visnyk ahraryoi nauky – Bulletin of Agrarian Science*, 1, 19-21. (in Ukrainian).

Gerke, K. M., Saydl, R. K., Turumtaev, S. B. (2010). Impact of preferred pathways in the vertical moisture transfer in the aeration zone: an experimental study. *Geocology*, 5, 422–432.

Korost, D. V., Kalmukov, G. A., Yapaskryt, V. O., Ivanov, M. K. (2010). The application of computer microtomography for studying the structure of clastic reservoirs. *Oil and Gas Geology*, 2, 36–42.

Pires, L. F., Borges, J. A. R., Bacchi, O. O. S., Reichardt, K. (2010). Twenty-five years of computed tomography in soil physics: F literature review of Brazilian contribution. *Soil and Tillage Research*, 110, 197–210.

Rogasik, H., Crawford, J. W., Wendroth, O., Young, I. M., Joschko, M. & Ritz, K. (1999). Discrimination of soil phases by dual energy X-ray tomography. *Soil Science of America J.*, 63, 741–751.

Udawatta, R., Anderson, S. H. (2008). CT-measured pore characteristics of surface and subsurface soils influenced by agroforestry and grass buffers. *Geoderma*, 145, 381–389.

Kim, H. M., Anderson, S. H., Motavalli, P. P., Gantzer, C. J. (2010). Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. *Geoderma*, 160, 244–251.

Tippkötter, R., Eickhorst, T., Taubner, H., Gredner, B., Rademaker, G. (2009). Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocus X-ray tube computerized tomography (μ CT). *Soil and Tillage Research*, 105, 12–20.

Sander, T., Gerke, H. H., Rogasik, H. (2008). Assessment of Chinese paddy-soil structure using X-ray computed tomography. *Geoderma*, 145, 303–314.

Pires, L. F., Arthur, R. C. J., Correchel, V., Bacchi, O. O. S., Reichardt, K. (2004). The use of gamma ray computed tomography to investigate soil compaction due to core sampling devices. *Braz. J. Phys.*, 34, 728–731.

Peth, S., Nellesen, J., Fischer, G., Horn, R. (2010). Non-invasive 3D analysis of local soil deformation under mechanical and hydraulic stresses by μ CT and digital image correlation. *Soil and Tillage Research*, 111, 3–18.

Pires, L. F., Borges, J. A. R., Bacchi, O. O. S., Reichardt, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: F literature review of Brazilian contribution. *Soil and Tillage Research*, 110, 197–210.

Goldstein, L., Prasher, S. O., Ghoshal, S. (2007). Three-dimensional visualization of no-aqueous phase liquid volumes in natural porous media using a medical X-ray computed tomography scanner. *Contaminant hydrology*, 93, 96–100.

Pedrotti, A., Pauletto, E. A., Crestana, S., Cruvinel, P. E., Vaz, P. E., Naime, J. M., Silva, A. M. Planosol soil sample size for computerized tomography measurement of physical parameters. *Sci. Agric.*, 60, 735–740.

Peth, S., Horn, R., Beckmann, F., Donath, T., Fischer, J., Smucker, A. J. M. (2008). Threedimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based micromorphology. *Soil Science Society of America J.*, 72, 897–907.

Sleutel, S., Cnudde, V., Masschaele, B., Vlassenbroek, J., Dierick, M., van Hoorebeke, L., Jacobs, P., de Neve, S. (2008). Comparison of different nano- and micro-focus X-ray computed tomography set-ups for the visualization of the soil microstructure and soil organic matter. *Computer and Geosciences*, 931–938.

Schrader, S., Rogasik, H., Onasch, I., Jegou, D. (2007). Assessment of soil structural differentiation around earthworm burrows by means of X-ray tomography and scanning electron microscopy. *Geoderma*, 137, 378–387.