

УДК 631.5

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406-07>

ФОРМУВАННЯ ХІМІЧНОЇ СТРУКТУРИ ЗОЛИ З СОЛОМИ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ ЗАЛЕЖНО ВІД РОДЮЧОСТІ ҐРУНТУ ТА ВНЕСЕНИХ ДОБРИВ

Вакал С. В.¹

^{1,2} Науково-дослідний інститут мінеральних добрив і пігментів
Сумський державний університет
вул. Харківська, п/в 12, м. Суми, 40003
s.vakal@mindip.sumdu.edu.ua

Шепета К. О.³

^{3,4} ТОВ «КРОП-ІНКРІС»
1-ий провулок Свободи, буд. 8, м. Ромни, 42000
kirilshepeta007@gmail.com

Вакал В. С.²*vsvakal@gmail.com***Ізмоденова Т. І.⁴***izmodenova.tati@gmail.com*

У зв'язку із зростанням цін на традиційні джерела енергій в світі – природного газу, нафти, кам'яного вугілля, актуальність відновлювальних джерел енергії суттєво зростає [1]. До джерел відновлювальної енергетики традиційно відносяться біопаливо з багаторічної деревини та пожнивних решток сільськогосподарських рослин.

За даними Державної служби статистики України кількість використаної деревини для генерації (переважно тепла) в 2020 році становила 7473096,3 тонн, що на 14,7% більше ніж в 2017 році. При цьому, для теплоутворення істотно збільшилося використання біопалива з пожнивних решток (солома, листя, лузга соняшника, відходи після перероблення рослинної сировини тощо) сільськогосподарських рослин. Так, у 2017 році для генерації тепла було спалено 119 0681 тонн твердого біопалива рослинного походження, а в 2020 рр., – 1707 861 тонн [2].

Після різкого зростання ціни на природний газ в 2021 році та з початком повномасштабної війни в Україні, споживання тепла від спалення біопалива істотно збільшилося.

Зокрема, значно зросло споживання біопалива з метою генерації тепла для сушіння зерна кукурудзи, соняшника, сої в сільськогосподарських підприємствах Сумської та Чернігівської областей. Так, відповідно наданих даних ТОВ «Кроп-Інкріс» (м. Ромни, Сумська область), в 2020 році до 65,4% клієнтів компанії сушили продукцію рослинництва спалюючи природний газ, 23,6% клієнтів комбінували газ і тверде паливо (деревина та солома), до 5,4% клієнтів використовували тільки мазут. Але в 2023 році ситуація кардинально змінилася. Нині газом користуються 34,1% клієнтів, комбінують газ з твердим паливом – 30,7%, деревину і солому – 29,5%, мазут використовують – 5,7% клієнтів.

При низьких цінах та утримання на таких рівнях на зерно кукурудзи, сої і соняшнику, кількість господарств що відмовилися від газового сушіння буде збільшуватися.

Через наявність значної кількості золи від спалення біопалива виникає питання щодо зберігання, транспортування, утилізації та подальшого використання.

Утилізація золи проводиться переважно, вивозом на поля. В цьому є раціональне зерно, оскільки зола культурних однорічних рослин має підвищений вміст фосфору, калію та сірки. Через високий вміст в золі лужних структурують елементів таких як, кальцій і магній, внесення золи в ґрунт є ефективним заходом для відтворення родючості, особливо для нейтралізації кислих ґрунтів [3].

Золу з високим вмістом калію і фосфору також можливо також розглядати як сировину для виробництва комплексних добрив [4]. При цьому, актуальність використання золи збагаченої калієм та фосфором для виробництва добрив висока. Дещо змінився асортимент фосфорних та калійних добрив, відповідно зросла їхня вартість [5].

Дослідження вказують про існування вагомих відмінностей щодо складу хімічних елементів в золі біопалива залежно від його виду (деревина або рештки однорічних рослин) та видового складу рослинних решток (однорічні злакові або двосім'ядольні культурні рослини). При цьому, виявлені значні варіювання вмісту окремих біогенних хімічних елементів в золі від спалення рослинних решток одного виду рослин [6].

В попередніх дослідженнях виявлялися зразки золи з досить високим вмістом біогенних хімічних елементів для рослин, а саме фосфору, калію та сірки. В зв'язку з цим, у авторів виникла необхідність дослідити генезис формування хімічного складу золи однорічних культурних рослин на прикладі соломи озимої пшениці.

Такі дослідження виявляють інтерес через перспективність використання золи від спалення решток культурних рослин з високим вмістом фосфору, калію та сірки для виробництва комплексних добрив.

Авторами досліджувалися вплив ґрунту, внесення добрив, агротехнічних елементів технологій вирощування на вміст хімічних елементів в тканинах рослин та в золі соломи озимої пшениці.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, біопаливо, солома, деревина, лузга сояшника, перероблення, рослинної сировини.

Changes in the chemical structure of ash derived from winter wheat straw as influenced by soil fertility and applied fertilizers. *Vakal S. V., Shepeta K. O., Vakal V. S., Izmodenova T. I.*

The rising costs of traditional fuels have led to increasing scientific and practical interest in renewable energy sources, which traditionally include biofuels derived from perennial wood and crop residues.

Between 2017 and 2020, the amount of wood and crop residues burned for energy generation, mainly in the form of heat, increased by 14.7% and 43.4%, respectively, in Ukraine. The authors of this article have determined that, due to the ongoing war, the shift towards biofuels is expected to accelerate significantly.

The increased production of ash from biofuel combustion in agricultural enterprises has highlighted the need for effective management, storage, transportation, and utilization of combustion products. Given the variability in ash composition, developing recommendations for its more rational use as a raw material in complex fertilizer production technologies is highly relevant.

It has been established that the content of chemical elements in plant residues and ash depends not only on biogenic factors (such as whether the plants are monocotyledonous or dicotyledonous, annual or perennial) but also on soil fertility parameters and applied fertilizers.

Among other soil fertility indicators, the sum of absorbed bases ($\text{CaO} + \text{MgO}$) was found to influence the accumulation of magnesium and phosphorus in plants and their resulting ash. The sulfur and potassium content in wheat straw ash increased when winter wheat was grown in soils enriched with mobile forms of these nutrients.

The application of sulfur fertilizers in the form of sulfates increased the sulfur, phosphorus, and potassium content in the ash. It was also found that excessive use of sulfate fertilizers led to a decrease in the proportion of magnesium in plant residues and ash.

Phosphorus fertilizers, regardless of whether they were citrate-soluble or water-soluble, effectively increased the phosphorus and potassium content in the ash from burned winter wheat residues. Potassium fertilizers contributed to the accumulation of potassium in both plant residues and their resulting ash upon combustion.

The results of these studies convincingly demonstrate that the genesis of the chemical composition of ash from biofuel combustion has not only a biogenic nature but also lithogenic and agrochemical origins.

The study results and their statistical analysis are useful for developing a predictive model of the chemical composition of ash from biofuel combustion and for planning its utilization or use in complex fertilizer production.

Keywords: renewable energy sources, biofuel, straw, wood, sunflower husk, processing, plant raw materials.

Методика і матеріали досліджень

Робота проводилася в лабораторії ТОВ «Кроп-Інкрис» та Науково-дослідному інституті мінеральних добрив і пігментів (структурний підрозділ Сумського державного університету). Відбір соломи сільськогосподарських культур для досліджень, проводили в господарствах Сумської та Чернігівської областей під час жнив.

Під час відбору зразків на полях, аналізувалась інформація щодо особливостей технологій вирощування культур (сівозміни, строки посіву, системи удобрення, агрохімічні властивості ґрунтів тощо). Дані кліматичних умов щодо формування рослин озимої пшениці у 2020–2022 рр., було отримано з електронних ресурсів [7].

Відбір соломи для спалення проводили в посівах озимої пшениці, що вирощувалася на дернових, дерново-опідзолених, сірих лісних, чорноземних опідзолених та типових ґрунтах.

В господарствах де проводили відбір рослинного матеріалу на визначення зольності і вмісту хімічних елементів в золі озимої пшениці аналізували фізико-механічні і хімічні властивості ґрунтів, на вміст в них азоту, фосфору, калію та інших елементів живлення згідно Агрохімічних паспортів полів, земельних ділянок виданих господарствам філіями ДУ «Держґрунтоохорона» (період 2017–2020 рр.).

Загалом за період 2021–2022 рр., було відібрано 102 зразки соломи озимої пшениці.

Після отримання зразків соломи, рослинний матеріал ретельно очищували від залишків ґрунтоутворюючих порід (кварцу, польових шпатів, суглинистих часток з високим вмістом карбонату кальцію тощо) методом струшування. А сильно забруднені зразки промивали та підсушували. Далі подрібнювали на відрізки розміром 1–3 см. Методом квартування створювали середні про-

би, маса кожної проби не менше 100 грам. Середні проби рослинного матеріалу сушили при температурі 60–65°C до повітряно-сухого стану. Після сушіння пробу мололи на лабораторному млині та просіювали через сито. Мелені рослинні зразки озолювали у муфільній печі при температурі 800±25°C. Визначали питому вагу золи, її зольність та рН 1% розчинів золи.

Лабораторні дослідження на вміст елементів в золі проводили із застосуванням різних методів аналізу: фотометричного, гравіметричного, комплексонометричного, турбідиметричного та потенціометричного.

Групування отриманих зразків золи після хімічного аналізу здійснювали залежно від ґрунтово-кліматичних умов вирощування озимої пшениці, кількості внесених добрив та ключових елементів технологій. Отримані результати фізико-хімічних властивостей золоматеріалів за кожним показником статистично опрацьовувались. Також визначались середні, мінімальні та максимальні значення фізико-хімічних показників і вмісту хімічних елементів для обчислення інтервалів варіювання отриманих значень показників проводили обчислення середніх квадратичних відхилень для генеральних вибірок та помилок середніх арифметичних для груп в межах генерального параметрів. Для виявлення впливу факторів на формування хімічного складу в золі проводили також дисперсійні, кореляційні та регресійні аналізи відповідно загально визнаних методів статистичного аналізу [8].

Результати досліджень та їх обговорення

Зола соломи озимої пшениці, яку отримували в умовах лабораторного спалення, являє собою пилоподібний залишок від сірого до біло-сірого кольору. Залишок від спалення соломи озимої пшениці мав питому вагу від 0,106 до 0,402 кг/м³. Розчини золи у воді мали високу лужну реакцію. Так, показники рН варіювали в межах 11,40–11,91.

Елементний склад золи соломи озимої пшениці був представлений переважно кальцієм, магнієм, калієм, фосфором та сіркою у вигляді оксидів, гідроксидів, солей, кристалогідратів та комплексних сполук (табл. 1). Вміст інших елементів не перевищував 1,0%.

Найбільшою питома вага в золі у роки досліджень була в калію. Так, в зразках золи його вміст в перерахунку на K_2O в середньому, у 2021 році складав 30,18%, а в 2022 році – 29,07%. Коефіцієнт варіації вмісту калію був середнім і не перевищував 21,80%.

Значно менше в золі виявляли інші біогенні макроелементи – сірка, магній, фосфор та кальцій. При цьому, коефіцієнти варіації вмісту згаданих елементів були значними та перевищували 33,26%, що вказує на існування значного впливу певних ключових факторів на вміст в золі сірки, магнію, фосфору і кальцію та генезис хімічного складу золи рослинного походження (табл. 1).

Перед дослідженням генезису хімічного складу та визначення ключових факторів впливу на формування хімічного складу золи соломи озимої пшениці, авторами були проведені кореляційні аналізи залежності вмісту одних елементів від інших (табл. 2).

Показники коефіцієнтів регресії між вмістом кальцію і магнієм, кальцію і калію та кальцію і фосфору в золі були в роки досліджень в межах від $r = -0,156$ до $r = 0,134$, що вказує про відсутність вірогідного зв'язку між цими хімічними елементами

в процесі формування рослин озимої пшениці та після їх спалювання – золи. Отже варіювання показників питомої ваги кальцію було незалежним від вмісту калію і фосфору в золі.

Проте, виявлено стійкий в усі роки досліджень вірогідний негативний зв'язок між вмістом кальцію і сірки. Збільшення сірки в золі супроводжувалося зменшенням питомої ваги не тільки кальцію, але і магнію. Так, коефіцієнт кореляції між вмістом сірки і кальцієм в 2021 році становив $r = -0,369$, в 2022 році – $r = -0,340$, між сіркою і магнієм в 2021 і 2022 роках відповідно – $r = -0,303$ і $-0,348$.

Питома вага марганцю в золі також зменшувалася за рахунок збільшення вмісту калію і фосфору в усі роки проведення досліджень. Так, коефіцієнти кореляції між вмістом в золі марганцю і калію та марганцю і фосфору мали статистично вірогідні негативні значення.

Під час вивчення хімічної структури золи встановлено і позитивний зв'язок між вмістом калію і фосфором (табл. 2). Здебільшого, зразки золи з соломи з високим вмістом калію і фосфору були отримані після відбору рослинних решток озимої пшениці вирощеної на високих агрофонах

Таблиця 1

Хімічний склад золи соломи озимої пшениці

Хімічний елемент	Вміст основних хімічних елементів, %			Середнє квадратичне відхилення, %	Коефіцієнт варіації, %
	середнє	min.	max.		
2021 рік					
CaO	8,04	2,49	14,41	2,67	33,26
MgO	3,19	0,61	7,12	1,41	44,31
K_2O	30,18	12,05	42,38	6,25	20,71
P_2O_5	9,21	3,75	16,25	3,06	33,24
SO_3	7,67	1,11	18,52	4,07	53,02
2022 рік					
CaO	8,11	3,21	15,55	2,65	32,63
MgO	3,82	0,61	8,35	1,70	51,21
K_2O	29,07	11,15	42,92	6,34	21,80
P_2O_5	7,71	4,17	16,25	2,50	32,42
SO_3	4,84	1,48	10,89	3,01	62,18

Коефіцієнти кореляції (r) між хімічними елементами в золі соломи озимої пшениці

Хімічний елемент	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
2021 рік					
CaO	1,000	-	-	-	-
MgO	0,134	1,000	-	-	-
K ₂ O	-0,156	-0,355*	1,000	-	-
P ₂ O ₅	-0,060	-0,351*	0,321*	1,000	-
SO ₃	-0,369*	-0,303	0,093	0,281	1,000
2022 рік					
CaO	1,000	-	-	-	-
MgO	0,067	1,000	-	-	-
K ₂ O	-0,193	-0,377*	1,000	-	-
P ₂ O ₅	0,033	-0,380*	0,318*	1,000	-
SO ₃	-0,340*	-0,348*	0,048	-0,022	1,000

Примітка: *- коефіцієнти варіації статистично вірогідні на 1% рівні значимості (0,001 < P < 0,01).

з дотриманням технології вирощування та систем удобрення. Роль родючості ґрунту та добрив на вміст фосфору і калію в золі висвітлено в даній статті.

Збір додаткової інформації про ґрунтово-кліматичні умови вирощування, агротехніки та систем удобрення де проводили відбір зразків дозволив провести аналіз та виявити фактори впливу на формування структури хімічних елементів в рослинних рештках і золі озимої пшениці.

Кліматичні умови вегетації озимої пшениці в 2021–2022 роки, за температурними показниками були оптимальними та майже не відрізнялися від середньорічних. Проте, за кількістю доступної вологи для росту і розвитку рослин та формування урожайності озимої пшениці 2021 рік був дещо посушливішим ніж 2022 рік. Так, коефіцієнт вологозабезпеченості (визначається діленням доступної у ґрунті води і опадів на випарування) в 2021 році, залежно від ґрунтово-кліматичних зон Сумської і Чернігівської областей, становив від 0,81 до 1,03, а в 2022 році – від 1,16 до 1,38. Не зважаючи на більш сприятливі гідротермічні умови вегетації у 2022 році, середньозважена

урожайність озимої пшениці в господарствах відбору зразків соломи була майже на рівні 2021 року. Так, урожайність в 2021 році становила $58,04 \pm 5,78$ ц/га, в 2022 році – $55,97 \pm 5,54$ ц/га. Причина цього – зменшення кількості використання добрив при вирощуванні озимої пшениці.

В господарствах у 2021 році солому, зокрема, збирали в кількості $6,20 \pm 0,66$ т/га, в 2022 році – $6,05 \pm 0,6$ т/га. При середній зольності соломи 5,55%, потенціальний вихід золоматеріалів від спалювання соломи озимої пшениці в роки досліджень був межах 0,300 – 0,377 т/га.

Після збирання зразків рослинних решток, їх спалення, визначення фізико-хімічних властивостей та встановлення з місць відбору біоматеріалу показників фактичної урожайності зерна і соломи, авторами статті були створені масиви вихідних даних. Наступне групування яких, дозволило провести чисельні дисперсійні, кореляційні та регресійні аналізи. За результатами статистичних обчислень було виявлено, що кліматичні умови вегетації (температура та вологозабезпеченість), ключові елементи агротехніки (попередник, строки, густина посіву) та сорти

більше впливали на кількість біомаси з якої формувався урожай зерна і соломи, ніж на зольність соломи та хімічну структуру золи.

Проте, на генезис хімічного складу рослинних решток і золи встановлено статистично вірогідну роль родючості ґрунту та добрив.

Кальцій. При аналізі золи після спалення соломи озимої пшениці встановлено, що в усі роки досліджень переважали зразки з вмістом кальцію в них $7,1 \pm 0,58\%$. Так, в 2021 році таких було 52,9%, в 2022 році – 50,5% зразків (рис. 1).

водився в умовах вирощування озимої пшениці на ґрунтах з широким діапазоном від 8 до 24,5 мг-екв/100 г ґрунту суми увібраних основ (CaO + MgO), для цих типів ґрунтів з переважанням в 2-10 разів катіонів кальцію, не було встановлено статистично вірогідних зав'язків між вмістом в золі кальцію з кількістю обмінних катіонів кальцію і магнію в ґрунті.

Кореляційні аналізи не виявили статистично вірогідних зав'язків між вмістом в рослинних рештках і золі кальцію від кількості в ґрунтах,

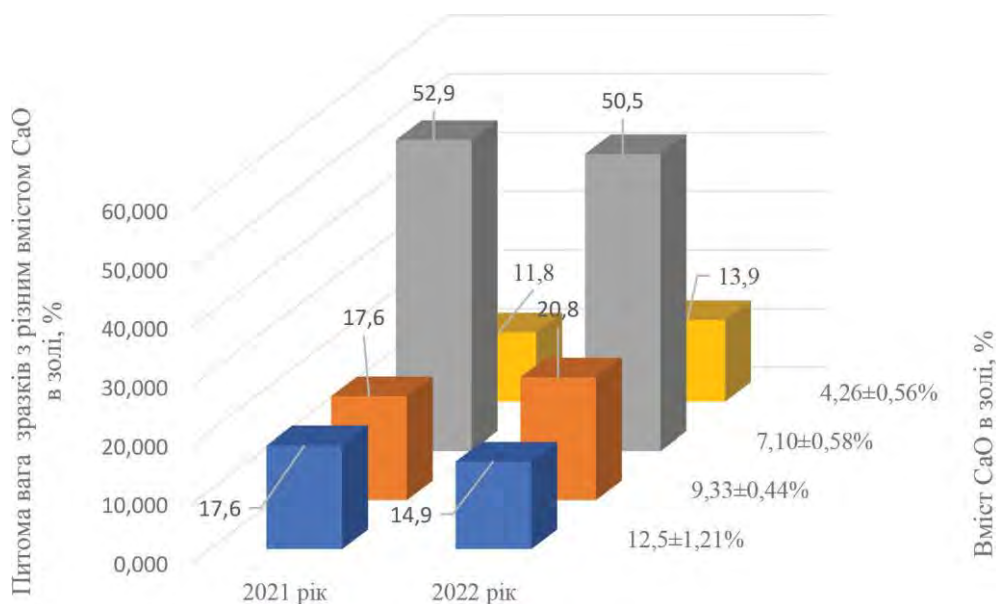


Рисунок 1. Структура зразків золи соломи озимої пшениці за вмістом CaO

До групи з найменшим вмістом кальцію у вигляді CaO $4,2 \pm 0,56\%$ в 2021 році відносились 11,8%, в 2022 році – 13,9% зразків.

Групи зразків за вмістом CaO $12,5 \pm 1,21\%$ та $9,33 \pm 0,44\%$ були дещо численнішими в усі роки досліджень. Проте, питома вага їх в генеральній виборці не перевищувала 20,8 % (рис. 1).

При цьому, в усі роки коефіцієнти варіації вмісту кальцію в золі були значними та становили в 2021 році – 32,63%, в 2022 році – 33,26%.

В зв'язку з тим, що варіювання показників вмісту кальцію в золі було високим, авторами була зроблена спроба виявити фактори впливу на накопичення кальцію в рослинних рештках.

Проте, незважаючи на те, що збір зразків рослинного матеріалу перед їх озоленням про-

на яких проводили збір рослинного матеріалу озимої пшениці рухомих форм фосфору, калію та сірки.

При цьому, вміст кальцію в рослинних рештках мав завжди від оптимально до профіцитного значення для росту і розвитку рослин озимої пшениці незалежно від ґрунтово-кліматичних умов вирощування, агротехніки, внесення різних за вмістом добрив та їх кількостей.

Отже, накопичення кальцію в рослинах відбувається упродовж вегетації, в якості джерела кальцію є ґрунт.

Незалежно від вмісту кальцію в ґрунті, його було достатньо для поглинання коренями, накопичення рослинами та формування продуктивності озимої пшениці.

Відтак, можна визнати, що генезис накопичення в рослинах озимої пшениці, а потім і в золі кальцію, в даному випадку має біолітну природу.

Магній. Коефіцієнти варіації вмісту магнію в золі соломи озимої пшениці, на відміну від калію, мали ще більші показники. Так, в 2021 році коефіцієнт варіації питомої ваги магнію в перерахунку на MgO становив 44,31%, в 2022 році був ще більшим – 51,21% (табл. 1).

В структурі зразків золи за вмістом магнію в усі роки досліджень переважали групи з питомою вагою MgO $3,23 \pm 0,30$ та $2,20 \pm 0,20\%$ (рис. 2).

В 2021 році хімічний аналіз виявляв відповідно 33,33 і 35,29%, в 2022 році – 30,69 і 36,63% зразків з цими показниками вмісту оксиду магнію в золі (рис. 2).

Кількість його внесення в цьому році залежно від господарства становила від 0 до 150 кг/га, при середньозваженій нормі 80,3 кг/га. В перерахунку на SO₃ – від 0 до 90,7 кг/га, при середньозваженій нормі 48,6 кг/га.

Обчислений коефіцієнт кореляції між кількістю внесених сірчаних добрив і вмістом магнію в золі в 2021 році був негативним і статистично вірогідним та мав значення $r = -0,533$, за регресійною моделлю при внесенні 10 кг/га сірки в перерахунку на SO₃ в міст магнію у вигляді MgO зменшувався на 0,27% (табл. 3).

Вплив азотно-сірчаного добрива на накопичення в біомасі магнію, а потім прояв в золі, є опосередкованим. Він проявляється через біоло-

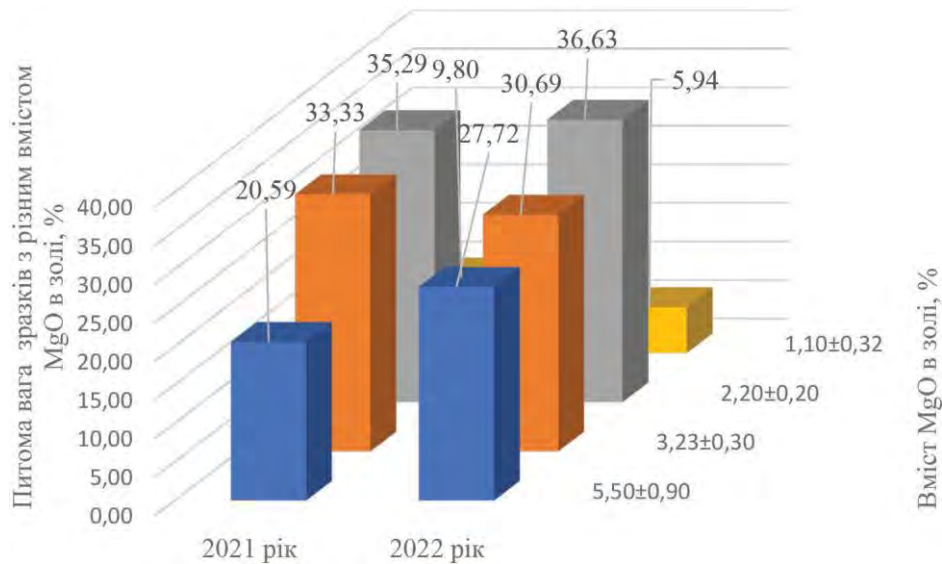


Рисунок 2. Структура зразків золи соломи озимої пшениці за вмістом MgO

При проведенні кореляційних аналізів для виявлення зв'язків між вмістом в золі магнію та в ґрунті суми увібраних основ (CaO + MgO), рухомих форм фосфору, калію, сірки і внесенням добрив (різних форм азоту, фосфору, калію, сірки) встановлено, що на вміст магнію в 2021 році проявився вплив внесення сірчаних добрив, в 2022 році – вміст обмінних катіонів в ґрунті.

В період вегетації озимої пшениці 2021 року, в господарствах областей азотні добрива для підживлення використовували в широкому кількісному діапазоні. Для азотно-сірчаного добрива популярність сульфат амонію досить висока.

гічну денітрифікацію амонію з утворенням азотної і сірчаної кислоти у ґрунтовому розчині та через активну участь в обмінних реакціях сульфат аніонів з катіонами кальцію, магнію, калію і водню на межі ґрунтово-поглинаючого комплексу і ґрунтового розчину, з наступним вивільненням аніонів гідроксиду та утворення гідроксиду магнію, який майже нерозчинний у воді. Таким чином, магній стає недоступним для поглинання коренями рослин. Проте, дефіциту необхідного магнію в рослинах озимої пшениці для формування продуктивності в роки дослідження, не виявлено.

Таблиця 3

**Вплив сірчаних добрив у сульфатній формі та суми увібраних основ (CaO + MgO)
на вміст магнію в золі соломи озимої пшениці**

Фактор впливу	Вміст магнію у вигляді MgO в золі, %		
	Коефіцієнт кореляції (r)	Коефіцієнт детермінації (сила впливу факторів) (D = r ² x 100%)	Регресійне рівняння (y = ax + b)*
Сірчані добрива у формі сульфатів, в перерахунку на SO ₃ , кг/га	2021 рік		
	- 0,533**	28,4%	y = - 0,027x + 4,524
	2022 рік		
	- 0,100	-	y = - 0,005x + 3,539
Сума увібраних основ (CaO + MgO), мг-екв./100 г ґрунту	2021 рік		
	0,100	-	y = 0,015x + 2,856
	2022 рік		
	0,338**	11,4%	y = 0,069x + 1,670

Примітка: * - Регресійне рівняння $y = ax + b$, де y – статистично визначений вміст елемента в золі, x – значення фактору впливу;

** - значення коефіцієнту кореляції і регресійної моделі статистично вірогідні на 1% рівні значимості ($0,001 < P < 0,01$).

В 2022 році внаслідок війни кількість добрив для весняного підживлення озимої пшениці в господарствах значно скоротилося, середньозважена норма внесення сульфату амонію у фізичній вазі становила 64,4 кг/га, в перерахунку на SO₃ – 39 кг/га. Зі свого боку, зв'язок між внесенням сірчаних добрив і вмістом магнію в золі був статистично непідтвердженим (табл. 3).

Проте, в 2022 році проявився вплив суми увібраних основ (CaO + MgO) на накопичення в золі магнію. Коефіцієнт кореляції між показниками вмісту магнію і сумою увібраних основ в ґрунті був статистично вірогідним та становив $r = 0,338$, за регресійною моделлю, при збільшенні в ґрунті суми обмінних катіонів, зростає питома вага магнію у золі соломи озимої пшениці (табл. 3).

Як висновок, вміст магнію в рослинних залишках озимої пшениці та золі залежить від наявності рухомих форм магнію в ґрунті. При застосуванні підвищених норм сульфату амонію в якості добрива є ризику зменшення рівня рухомості магнію в ґрунті та обмеження його доступності для рослин. Проте, авторами не виявлено

дефіциту цього елемента в рослинах озимої пшениці.

Отже, встановлено, що генезис магнію в золі соломи має як біолітну так агрохімічну природу.

Сірка. При аналізі хімічного складу золи соломи виявляли до п'яти груп зразків за кількістю сірки в золі. Проте, залежно від року досліджень їх кількість змінювалася. Так, за умов використання високих кількостей сірчаних добрив в 2021 році зростав середній рівень вмісту сірки до $7,67 \pm 4,07\%$ в генеральній виборці (табл. 1) та виділялася група зразків з надзвичайно високим середнім вмістом сірки – $13,87 \pm 2,36\%$. Питома вага зразків з цієї групи становила 19,61%.

На фоні зменшення внесення сірчаних добрив в 2022 році основною була група зразків з середнім вмістом сірки $4,11 \pm 0,46\%$, з питомою вагою серед проаналізованих зразків – 39,60% (рис. 3).

Попри те, що в 2021 році використовували сірчані добрива у значних кількостях, вплив сірчаних добрив на збільшення вмісту сірки в рослинних рештках і золі проявлявся, але статистично був слабким. Це пояснюється тим, що

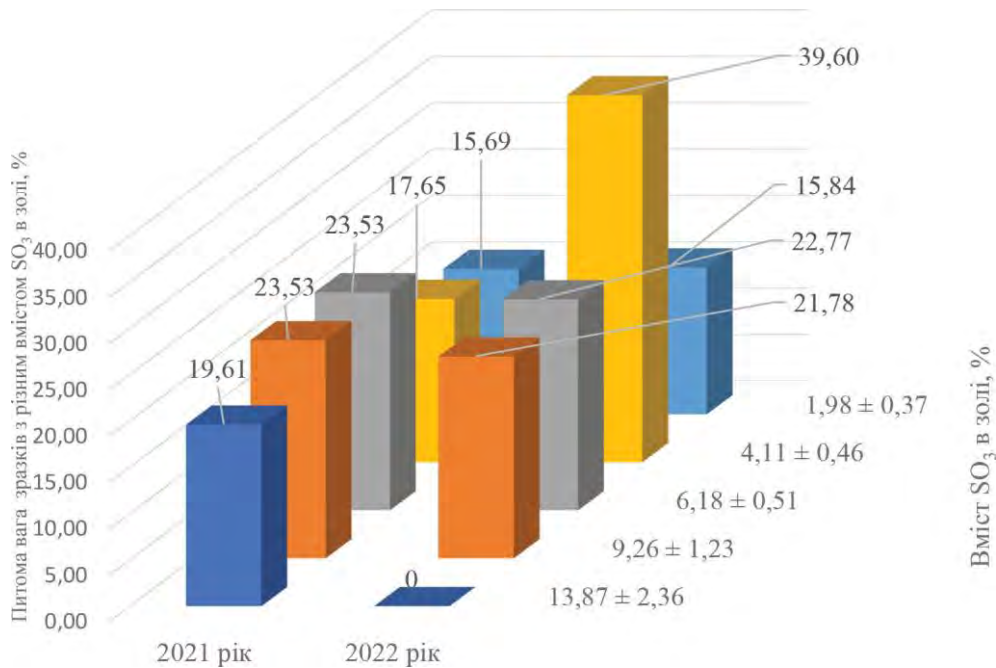


Рисунок 3. Структура зразків золи соломи озимої пшениці за вмістом SO₃

Таблиця 4

Роль ґрунтової сірки та сірчаних добрив у сульфатній формі у накопиченні сірки в золі соломи озимої пшениці

Фактор впливу	Вміст сірки у вигляді SO ₃ в золі, %		
	Коефіцієнт кореляції (r)	Коефіцієнт детермінації (сила впливу факторів) (D = r ² x 100%)	Регресійне рівняння (y = ax + b)*
Вміст сірки в ґрунті, мг/кг ґрунту	2021 рік		
	0,323**	10,4%	y = 0,684x + 3,418
	2022 рік		
	0,176	–	y = 0,251x + 3,463
Сірчані добрива у формі сульфатів, в перерахунку на SO ₃ кг/га	2021 рік		
	0,085	–	y = 0,013x + 7,059
	2022 рік		
	0,372**	13,8%	y = 0,036x + 3,449

Примітка: * - Регресійне рівняння $y = ax + b$, де y – статистично визначений вміст елемента в золі, x – значення фактору впливу;

** - значення коефіцієнту кореляції і регресійної моделі статистично вірогідні на 1% рівні значимості ($0,001 < P < 0,01$).

в дослідних господарствах норми внесення сірчаних добрив були високими та наближеними до рекомендованих.

Натомість, в 2021 році виявлена роль ґрунтового фактору в накопиченні сірки в рослинних рештках та золі. Статистично доведений зв'язок

між вмістом сірки в ґрунті та золі спаленої соломи озимої пшениці. Так, коефіцієнт кореляції між цим показниками становив $r = 0,323$.

Роль сірчаних добрив в збільшенні вмісту сірки в рослинних залишках та золі вдалося встановити в 2022 році. Через часткове скорочення та відмову від застосування сульфату амонію в період вегетації озимої пшениці в цьому році виявлено тісний зв'язок між кількістю внесених сірчаних добрив та вмістом сірки в золі (табл. 4).

Отже, з високим рівнем достовірності, накопичення сірки в рослинних рештках і золі залежить від вмісту сірки в ґрунті та кількості внесених сірчаних добрив.

Вивчення хімічного складу в зразках рослинного матеріалу і золі соломи озимої пшениці фактично рівні вмісту сірки були досить високими, при проведенні перерахунків на біомасу рослинних решток – бездефіцитні.

Отримані результати свідчать, що генезис сірки, як і магнію в золі соломи також має як біолітну так і агрохімічну природу.

Фосфор. Розподіл зразків золі за вмістом фосфору в золі залежно від року досліджень кардинально відрізнявся. В 2021 році на тлі дотримання більшістю господарств рекомендацій

стосовно внесення основних добрив виявляли 30,39% зразків з підвищеним вмістом фосфору (у виді P_2O_5 $12,68 \pm 1,79\%$) в золі. Внаслідок зростання цін в 2021 році на фосфорні добрива в більшості господарств норми внесення в ґрунт під озиму пшеницю, значно зменшили. Як результат, в 2022 році кількість зразків з низьким вмістом фосфору (у вигляді P_2O_5 $5,89 \pm 0,91\%$) була найбільшою – 55,45%.

При цьому, на відміну від інших основних хімічних компонентів в золі, фосфор у значній кількості зразків рослин був у дефіциті. Так, зразки золі саме з вмістом фосфору в перерахунку на P_2O_5 $5,89 \pm 0,91\%$ були отримані з соломи озимої пшениці вирощеної в умовах дефіциту (рис. 4).

Роль різних форм фосфорних і сірчаних добрив та родючості ґрунту в накопиченні фосфору в рослинних рештках і золі також вдалось виявити за допомогою кореляційного і регресійного методів статистичного аналізу.

В 2021 році після внесення повноцінних за вмістом фосфору (цитрат – і водорозчинних форм) та значно більш високих норм комплексу добрив під озиму пшеницю виявлено тісний зв'язок між кількістю внесеного цитраторозчинного фосфору і вмістом фосфору в золі.

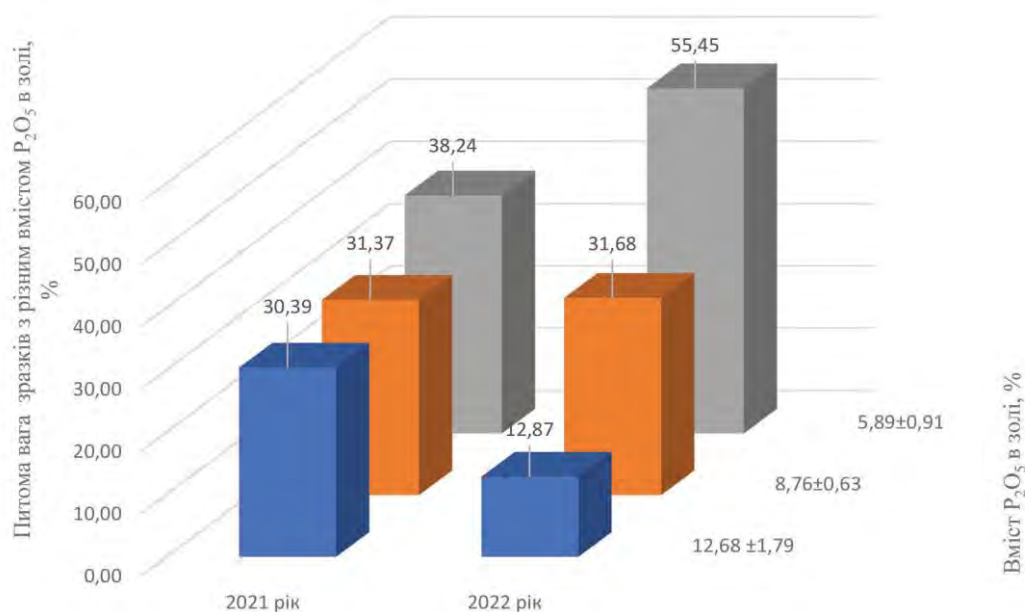


Рисунок 4. Структура зразків золі соломи озимої пшениці за вмістом P_2O_5

Вплив фосфорних і сірчаних добрив у сульфатній формі та суми увібраних основ (CaO + MgO) на вміст фосфору в золі озимої пшениці

Фактор впливу	Вміст фосфору у вигляді P ₂ O ₅ в золі, %		
	Коефіцієнт кореляції (r)	Коефіцієнт детермінації (сила впливу факторів) (D = r ² x 100%)	Регресійне рівняння (y = ax + b)*
Цитратні фосфорні добрива, в перерахунку на P ₂ O ₅ кг/га	2021 рік		
	0,369**	13,6%	y = 0,116x + 7,532
	2022 рік		
	- 0,203	-	y = - 0,089x + 8,593
Водорозчинні фосфорні добрива, в перерахунку на P ₂ O ₅ кг/га	2021 рік		
	0,065	-	y = 0,193x + 9,909
	2022 рік		
	0,333**	11,1%	y = 0,081x + 6,621
Сірчані добрива у формі сульфатів, в перерахунку на SO ₃ кг/га	2021 рік		
	0,374**	14,0%	y = 0,042x + 7,189
	2022 рік		
	0,122	-	y = 0,010x + 7,328
Сума увібраних основ (CaO + MgO), мг-екв./100 г ґрунту	2021 рік		
	- 0,374**	14,0%	y = -0,118x + 11,923
	2022 рік		
	- 0,378**	14,3%	y = -0,114x + 10,426

Примітка: * Регресійне рівняння $y = ax + b$, де y – статистично визначений вміст елемента в золі, x – значення фактору впливу;

** значення коефіцієнту кореляції і регресійної моделі статистично вірогідні на 1% рівні значимості ($0,001 < P < 0,01$).

Так, коефіцієнт кореляції між нормами внесення добрива і питомою вагою фосфору в золі становив $r = 0,369$, при силі впливу добрива – 13,6%.

На тлі високих норм застосування сірчаних добрив у формі сульфатів, в 2021 році встановлено вплив цих видів добрив на накопичення в рослинах і золі фосфору. Так, коефіцієнт кореляції між нормами внесення сірчаних добрив і вмістом фосфору в золі дорівнював $r = 0,374$, при значенні сили впливу фактору цього виду добрив – 14,0%. Ефективність сульфатної форми сірчаних добрив в накопиченні фосфору в рослинах пояснюється

властивостями цих добрив підкислювати ґрунтовий розчин та у такий спосіб підвищувати рухомість фосфору в ґрунті.

Значення водорозчинного фосфору в накопиченні золі фосфору виявили в 2022 році. В цьому році в господарствах, під озиму пшеницю норми внесення водорозчинного фосфору, на відміну від інших видів добрив, істотно не скоротили. Зв'язок між нормою внесення водорозчинної форми фосфору і питомою вагою в золі був тісним та статистично вірогідним, коефіцієнт кореляції дорівнював $r = 0,333$, при силі впливу – 11,1% (табл. 5).

Крім агрохімічних факторів, виявлено роль ґрунту на накопичення в рослинах та золі фосфору. Найбільш тісним в усі роки досліджень був зв'язок між сумою увібраних основ ($\text{CaO} + \text{MgO}$) в ґрунті та вмістом фосфору в золі. При цьому, зв'язок має стійку негативну залежність (в 2021 році коефіцієнт кореляції становив $r = -0,374$, в 2022 році $r = -0,378$). Причина – зниження рухомості фосфору через утворення нерозчинних солей ортофосфорної кислоти з кальцієм і магнієм при збільшенні суми основ ($\text{Ca}+2$ і $\text{Mg}+2$) на межі ґрунтово - поглинаючого комплексу і ґрунтового розчину.

Відтак, на накопичення фосфору у рослинах і золі озимої пшениці найбільш ефективно впливали фосфорні (цитрат- і водорозчинні форми) та сульфатні форми сірчаних добрив.

На вміст фосфору в рослинах і потім в золі впливала концентрація основ ($\text{CaO} + \text{MgO}$) на межі ґрунтово–поглинаючого комплексу і ґрунтового розчину. При цьому, серед інших показників родючості ґрунту, саме сума увібраних основ мала найбільший вплив на поглинання та накопичення фосфору рослинами озимої пшениці.

Отже, генезис фосфору в золі соломи також має як біолітну, так агрохімічну природу.

Калій. В усіх досліджених зразках золі соломи кількість калію була найбільшою. Проте, питома вага калію в роки досліджень, в зразках золі була неоднаковою (табл. 1).

В умовах (2021 рік) внесення підвищених норм добрив, зокрема калійних, переважали зразки золи з високим (як K_2O $36,82 \pm 1,82\%$) і середнім (як K_2O $28,52 \pm 2,56\%$) вмістом. Так, питома вага зразків з високим і середнім вмістом відповідно становила 39,22 і 40,20%. При збільшенні кількості господарств (2020 рік), які зменшили норми або відмовилися від використання добрив, структура зразків за вмістом калію значно змінилася. В даних умовах переважали зразки з середнім вмістом калію – 63,37% (рис. 5).

При трансформації показників вмісту калію в золі в біомасу озимої пшениці, вміст калію в усіх зразках був бездефіцитним.

В усі роки досліджень на накопичення в рослинах та золі калію постійно визначали вплив родючості ґрунту. Найбільш тісним зв'язок виявляли між вмістом калію в ґрунті і золі соломи озимої пшениці. Так, коефіцієнти кореляції між вмістом калію в ґрунті і золі соломи в 2021–2022 рр., становили відповідно $r = 0,365$ і $r = 0,318$, при силі впливу фактору – 13,3 і 10,1% (рис. 5).

Внесення добрив є високоефективним агрохімічним заходом в регулюванні кількості калію в рослинах та золі після їх спалення.

Ефективність застосування цитраторозчинних фосфорних, калійних і сірчаних, у формі сульфатів добрив на накопичення калію рослинами озимої пшениці виявився завдяки більш системному застосуванню добрив у 2021 році.

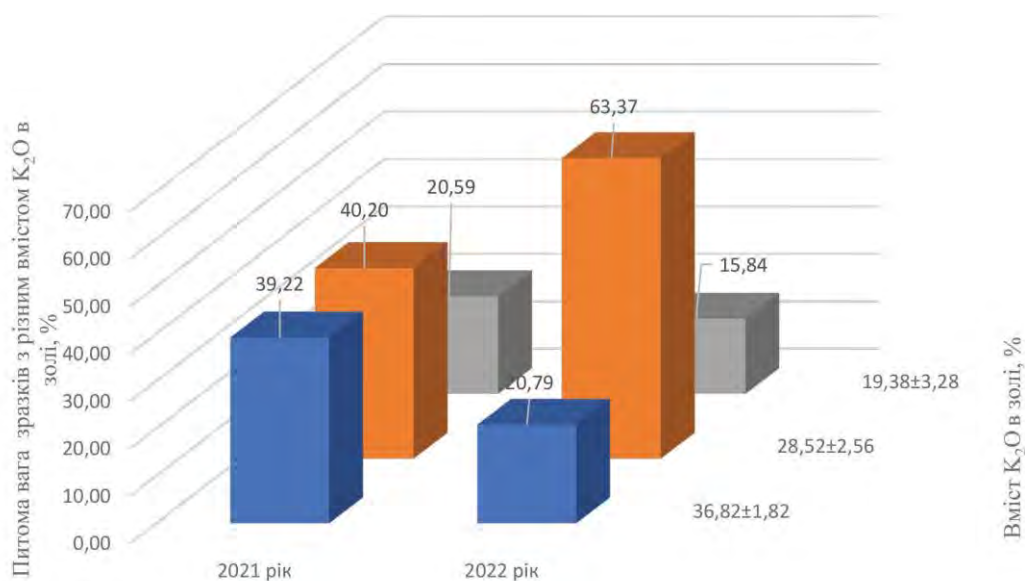


Рисунок 5. Структура зразків золі соломи озимої пшениці за вмістом K_2O

За результатами кореляційних аналізів зв'язки між застосуванням цих видів добрив і вмістом калію в золі були статистично вірогідними. Так, коефіцієнти кореляції між вмістом фосфору в золі та нормами внесення цитраторозчинних фосфорних, калійних і сірчаних у формі сульфатів добрив відповідно становили $r = 0,503$, $r = 0,371$ і

$r = 0,349$, при силі впливу факторів – 25,3%, 13,8% та 12,2%.

В 2022 році за умов зменшення об'ємів внесення добрив, при збереженні норм внесення водорозчинних форм фосфорних добрив вдалося встановити вплив водорозчинного фосфору на накопичення фосфору в рослинах і золі.

Таблиця 6

Вплив добрив та ґрунтового калію на вміст калію в золі озимої пшениці

Фактор впливу	Вміст калію у вигляді K_2O в золі, %		
	Коефіцієнт кореляції (r)	Коефіцієнт детермінації (сила впливу факторів) ($D = r^2 \times 100\%$)	Регресійне рівняння ($y = ax + b$)*
Вміст калію в ґрунті, K_2O мг/кг ґрунту	2021 рік		
	0,365**	13,3%	$y = 0,071x + 23,802$
	2022 рік		
	0,318**	10,1%	$y = 0,048x + 24,340$
Цитратні фосфорні добрива, в перерахунку на P_2O_5 , кг/га	2021 рік		
	0,503**	25,3%	$y = 0,321x + 25,509$
	2022 рік		
	-0,099	–	$y = -0,333x + 32,382$
Водорозчинні фосфорні добрива, в перерахунку на P_2O_5 , кг/га	2021 рік		
	0,006	–	$y = -0,004x + 30,228$
	2022 рік		
	0,309**	9,5%	$y = 0,271x + 25,425$
Калійні добрива, в перерахунку на K_2O , кг/га	2021 рік		
	0,371**	13,8%	$y = 0,181x + 25,112$
	2022 рік		
	-0,082	–	$y = -0,051x + 30,452$
Сірчані добрива у формі сульфатів, в перерахунку на SO_3 кг/га	2021 рік		
	0,349**	12,2%	$y = 0,070x + 26,798$
	2022 рік		
	-0,075	–	$y = -0,015x + 29,664$

Примітка:* - Регресійне рівняння $y = ax + b$, де y – статистично визначений вміст елемента в золі, x – значення фактору впливу;

** - значення коефіцієнту кореляції і регресійної моделі статистично вірогідні на 1% рівні значимості ($0,001 < P < 0,01$).

Так, коефіцієнт кореляції між вмістом фосфору в золі і нормами водорозчинного добрива становив $r = 0,309$, при силі впливу фактору – 9,5%.

Отже, на накопичення калію в рослинах і золі після їх спалення в роки дослідження виявляли вплив вмісту калію в ґрунті, значимість цитрато- і водорозчинних форм фосфорних, калійних і сірчаних, у формі сульфатів, проявлялася при дотриманні систем удобрення озимої пшениці (табл. 6).

Результати проведених досліджень свідчать, що генезис накопичення калію в рослинах озимої пшениці має біолітно – агрохімічну природу.

Висновки

1. Подорожчання традиційних видів палива призвело до зростання наукового і практичного інтересу до джерел відновлювальної енергетики. До джерел відновлюваної енергетики традиційно відноситься біопаливо з багаторічної деревини та поживних решток сільськогосподарських рослин.

2. Кількість спаленої деревини і поживних решток в Україні для генерування енергії, переважно у вигляді тепла, з 2017 по 2020 рік збільшилася відповідно на 14,7 та 43,4%. У зв'язку з військовими діями, динаміка переходу на біопаливо значно пришвидшиться.

3. Збільшення кількості золи від спалення біопалива в господарствах актуалізувало питання щодо поводження, зберігання, транспортування, утилізації продуктів горіння. В зв'язку з різноманітністю золи, актуальним є розроблення рекомендацій у більш раціональному використанні золи, як сировини в технологіях виробництва комплексних добрив.

4 Для прогнозування та отримання золи з високими показниками вмісту важливих для виробництва комплексних добрив фосфору, калію

і сірки важливо знати природу накопичення цих біогенних елементів живлення в рослинах і золі після їх спалення. Перспективним є виявлення ключових факторів впливу на формування хімічного складу золи біопалива.

5. Встановлено, що вміст хімічних елементів в рослинних рештках і золі з них залежить, крім біогенного (належність до одно- або двосім'ядольних, до одно- або багаторічних рослин) фактору, від показників родючості ґрунту та внесених добрив.

6. Серед показників родючості ґрунту виявлено вплив суми увібраних основ ($\text{CaO} + \text{MgO}$) на накопичення магнію та фосфору в рослинах і золі з них. Показники вмісту сірки та калію в золі соломи збільшувалися при вирощуванні озимої пшениці на ґрунтах збагачених рухомими формами цих елементів живлення.

7. Внесенням сірчаних добрив у формі сульфатів, вдавалося підвищувати вміст в золі сірки, фосфору та калію. Було виявлено зменшення питомої ваги магнію в рослинних рештках і золі на фоні надмірних норм застосування сульфатних добрив.

8. Фосфорні добрива, незалежно від цитрато- та водорозчинних форм, виявилися ефективними у збільшенні вмісту фосфору і калію в золі від спалення решток озимої пшениці.

9. Ефективність калійних добрив позначилося в накопиченні калію в рослинних рештках і в золі при їх спаленні.

10. Отримані результати проведених досліджень переконливо показують, що генезис структури хімічного складу золи від спалення біопалива крім біогенної, має літичну і агрохімічну природу походження.

11. Результати досліджень та їх статистична обробка є корисними для створення моделі прогнозування вмісту хімічних елементів в золі від спалення біопалива та складання планів щодо шляхів її утилізації або використання при виробництві складних добрив.

Список використаних джерел

1. Білявський М. Орієнтири розвитку альтернативної енергетики України до 2030 р.. [Електронний ресурс] / Максим Білявський – Режим доступу до ресурсу: <https://razumkov.org.ua/statti/oriientyry-rozvytku-alternatyvnoi-energetyky-ukrainy-do-2030r>.
2. Державна Служба Статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>.
3. Методичні вказівки з охорони ґрунтів / В. О. Греков, Л. В. Дацько, В. А. Жилкін, М. І. Майстренко. – Київ, 2011. – 108 с.
4. Крамар В. Г. Обґрунтування напрямів утилізації золи від спалювання біомаси. Зола біомаси як добриво в сільському господарстві. [Електронний ресурс] / В. Г. Крамар // Аналітична записка UABIO № 27. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/12/AZ_Kramar_Zastosuvannya-zoly-biomasy-yak-dobryva_fin_ukr2.pdf.
5. Арестархов О. Як гриби після дощу, або Чому ростуть ціни на добрива? Позиція Остхем. [Електронний ресурс] / О. Арестархов // <https://latifundist.com/>. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://latifundist.com/blog/read/3022-yak-grybi-pislya-doshchu-abo-chomu-zrosli-tsini-na-dobryva>.
6. Hurets L., Izmodenova T., Vakal V., Vakal S., Malovanyu M. Utilization of Renewable Energy Waste (Wood Ash and Straw) in the Production of Mineral Fertilizers. Ecological Engineering / Poland, 2024, 25(4), 332–339 p.
7. Foreign Agricultural Service. U.S. Department of Agriculture. <https://ipad.fas.usda.gov/>
8. Супрунович С. В. Статистичні та хемометричні методи в хімії: навч. посіб./ С. В. Супрунович, Ж. О. Кормош, Н. Ю. Сливка. – Луцьк: Вид-во ВНУ ім. Лесі Українки, 2022. – 210 с.