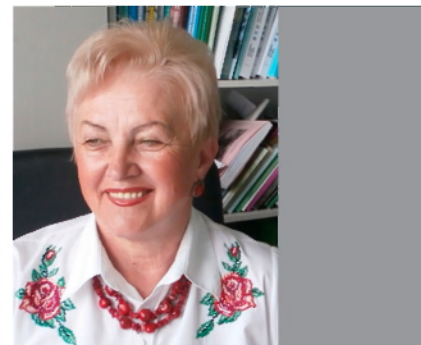




І. В. Вагнер
аспірант кафедри екології
та охорони навколишнього середовища
Дніпропетровського державного
аграрно-економічного університету

УДК 631.416.3



В. І. Чорна
доктор біологічних наук, професор,
завідувач кафедри екології
та охорони навколишнього середовища
Дніпропетровського державного
аграрно-економічного університету
wagner_ignatiy@mail.ru

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ПІД ВПЛИВОМ АКТИВНИХ ФОРМ КРЕМНІЮ

Анотація. Встановлено позитивний вплив кремнієвмісних сполук на продуктивність сільськогосподарських культур. Проаналізовано варіанти вегетаційного експерименту на трьох культурах – гречка, вика та соняшник, зафіксована їх енергія проростання та біомаса. Визначено, що оптимальна концентрація натрій метасилікату в вегетаційному експерименті склала 0,2 %. При використанні 0,4%-го розчину натрію метасилікату біомаса вики на педоземах збільшилась на 20% у відношенні до біомаси з варіантом 0,2%-го розчину. Для інших культур такої позитивної тенденції не виявлено. При застосуванні 0,3%-го та 0,4%-го розчинів Na_2SiO_3 виникає желеподібна плівка, на подолання якої у насіння не вистачає енергії проростання і розвиток рослини уповільнюється. Усі досліджувані сільськогосподарські культури на техногенно-порушених ґрунтах позитивно реагують на внесення кремнієвих сполук, збільшуючи біомасу.
Ключові слова: силікати, біомаса, педозем, дерново-літогенні ґрунти, сільськогосподарські культури.

І. В. Вагнер

аспірант кафедри екології та охорони навколишнього середовища
Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет

В. І. Чорна

доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони навколишнього середовища
Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет

ПОВЫШЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПОД ВЛИЯНИЕМ АКТИВНЫХ ФОРМ КРЕМНИЯ

Аннотация. Установлено положительное влияние кремнийсодержащих соединений на продуктивность сельскохозяйственных культур. Проанализированы варианты вегетационного эксперимента на трех культурах - гречка, вика и подсолнечник, зафиксирована их энергия прорастания и биомасса. Определено, что оптимальная концентрация натрия метасиликата в вегетационного эксперименте составила 0,2%. При использовании 0,4% раствора натрия метасиликата биомасса вики на педоземах увеличилась на 20% по отношению к биомассы с вариантом 0,2% -го раствора. Для других культур такой положительной тенденции не выявлено. При применении 0,3% -ного и 0,4% -ного растворов Na_2SiO_3 возникает желеобразная пленка, на преодоление которого у семян не хватает энергии прорастания и развитие растения замедляется. Все исследуемые сельскохозяйственные культуры на техногенно-нарушенных почвах положительно реагируют на внесение кремниевых соединений, увеличивая биомассу.
Ключевые слова: силикаты, биомасса, педозем, дерново-литогенные почвы, сельскохозяйственные культуры.

I. V. Wagner

Graduate Student
Dnipropetrovsk State Agrarian and Economics University

V. I. Chorna

Doctor of Biological Sciences, Professor,
Dnipropetrovsk State Agrarian and Economics University

PRODUCTIVIZATION OF CROPS UNDER THE INFLUENCE OF ACTIVE SILICON FORMS

Abstract. We showed the positive impact of silicon compounds on the crops productivization. Soil sampling was conducted on the Research Remediation Center of the Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University in Nikopol manganese ore basin. In the course of vegetation experiment, we conducted a series of laboratory experiments with the addition of Na_2SiO_3 in concentrations ranging from 0% to 0,4% (0%, 0,1%, 0,2%, 0,3%, and 0,4%). The main evaluation criterion was the reaction of plants (biomass change) to sodium silicate solution adding, regarding to the options of water irrigation. We selected seedling trays with cell size of 40×40×60 and the composite soil sample (blend of 40 samples from each experimental plot) weighing 30 g, which was optimal for a given cell size. The experiment lasted 14 days, watering was carried out every 3 days. We maintained the temperature and humidity in the range of 21-23 °C and 50-70% respectively. We selected buckwheat as the representative of the non-grain crops, vetch - as grain legumes, sunflower - as oil-bearing plants. pH of soils studied ranged from 7,1 to 7,8, characterizing the soil as slightly alkaline. We processed the data using Microsoft Excel 2010 and STATISTIKA 10.0. We analyzed 160 samples of plants and identified their biomass. It was determined that the best concentration of sodium metasilicate in vegetation experiment was 0,2%. When using higher concentrations of sodium metasilicate, the biomass was higher only in experiments when vetch growing on pedozems, in all other cases it did not give better results than comparing to using 0.2% concentration of sodium metasilicate. When using high concentrations of monosilicic acid, gel-like film generates, and seeds have lack of germinating energy to overcome this film, so plant growth slows down. All selected cultures on technogenic soils respond well to silicon compounds adding by increasing the biomass.
Keywords: silicates, biomass, pedozem, soddy-litogenous soils, agricultures.

Постановка проблеми. Ґрунт є найважливішим компонентом біосфери і його відновлення після розробки родовищ у Нікопольському марганцеворудному басейні є необхідною умовою регенерації техногенного ландшафту. Однак у більшості випадків темпи робіт з рекультивациі відстають від обсягів порушених земель, а технологічні прийоми, що застосовуються є екологічно малоефективними. Очевидно, що для підвищення ефективності рекультивациі та управління ґрунтогенезом в техногенних ландшафтах потрібні нові підходи. Останнім часом інтерес до наземного циклу кремнію у ґрунтах та у системі ґрунт – рослина істотно зріс. Роботи вчених [1, 2], вказують на важливість вивчення рухливих (активних) форм кремнію в системі ґрунт – рослина. Багато в чому зростання інтересу пов'язане з отриманням нових даних про роль кремнію не тільки як каркасного елемента крупнокристалічних мінералів, але найважливішого біогенного елемента, який контролює багато біологічних, хімічних та еволюційних процесів у наземних екосистемах біосфери [3, 4].

Кремній (Si) є другим, найбільш розповсюдженим елементом у земній корі. До тепер основні дослідження кремнію зосереджені на його участі у процесах вивітрювання, особливо у глиняних новоутвореннях буферних механізмах для регулювання кислотності ґрунтів або хімічній денудації ландшафтів. Але мало вчених розглядають оксид кремнію, як продукт ґрунтогенезу. Крім цього, існує зацікавленість у покращенні знань мікробіологічних та ризосферних процесів, які сприяють мобілізації кремнієвих сполук, що поглинаються рослинами [2]. Встановлення механізмів перерозподілу і ролі біогенного кремнію та процесів десилікації у ґрунтових профілях залишаються маловивченими [3]. Кремній є біофільним елементом, який бере участь у низці фізіологічних та біохімічних процесів і сприяє підвищенню врожаю та якості рослинної продукції. В ґрунті велика частина кремнію знаходиться в складі малорозчинних сполук, що недоступні рослинам. Вміст рухомих сполук кремнію в ґрунті досить низький і не перевищує 150–200 мг SiO₂/кг ґрунту [4]. Найважливішою ланкою біогеохімічного кругообігу кремнію є надходження і накопичення його в рослинах, взаємозв'язок цього процесу з живленням іншими біофільними елементами. Вміст кремнію в рослинах можна порівняти з вмістом основних макроелементів. У сухій масі рослин міститься 1–2 % Si, в їх золі – від 20 до 91 %.

Кремній є необхідний рослинам для стійкості до вилягання, влагонакопичення, заміщення фосфору при його дефіциті. У гумусовому горизонті ґрунтів кремнію, доступного рослинам, міститься мало – 1,3–3,2 % від його загального вмісту [5]. Високий вміст органічної речовини в ґрунті знижує доступний кремній. Кремній помітно впливає на хімію і фізику ґрунтів: підвищує рухливість фосфору, кальцію, рівень рН, ємність катіонного обміну, а зниження вилуження катіонів покращує постачання ґрунтом кисню; кремнієва кислота бере участь в утворенні гумінових кислот [6]. Дефіцит монокремнієвої кислоти і зменшення вмісту аморфного кремнезему призводять до руйнування органомінерального комплексу ґрунту, прискоренню деградації органічної речовини, погіршення мінералогічного складу. Для підтримки балансу монокремнієвої кислоти, з метою забезпечення її достатнього рівня для живлення рослин кремнієм і запобігання деградації ґрунтів необхідно внесення кремнієвих добрив. Кремній поглинається рослинами у більших кількостях, ніж деякі макроелементи (фосфор, калій, а часто й азот), безсумнівно відіграє важливу безпосередню роль в фізіологічних процесах. Однак ці процеси вивчені слабо [7].

Цикли C і Si тісно пов'язані з вивітрюваністю силікатів. В обох циклах, наземні рослини вносять значний вклад в процеси вивітрювання і ґрунтоутворення. Кремній трансформується, акумулюється та зберігається в рослинах у вигляді фітолітів, що у майбутньому може бути запасом кремнію у ґрунтах. Особливо велике значення

кремній має для зернових культур, його внесення сприяє підвищенню врожайів пшениці та кукурудзи. У фосфогіпсі, кремнію міститься до 1% і більше, і тому його внесення у нормі 1 т/га істотно покращує живлення рослин цим елементом [8]. Кремній на 2–2,5 тижні прискорює досягання кукурудзи та проростання насіння ячменю і рису, збільшує кореневу масу ячменю, підсилює фотосинтез і ріст рослин рису, прискорює його досягання, впливає на азотний, фосфатний і калійний обмін [4]. Він сприяє підвищенню посухостійкості рослин, стійкості рослин до ураження грибковими хворобами, шкідниками, вилягання низьких температур [9]. Диоксид кремнію становить більше половини мінеральних речовин, які зернові засвоюють з ґрунту. Вміст Si в рослинах досягає максимуму до кінця вегетації. Попередні дослідження показали, що застосування рисової соломи і органічних добрив може поліпшити живлення кремнію при вирощуванні рису, що вказує на роль органічної речовини ґрунту як важливого джерела кремнію для рису [10]. Крім того, рН ґрунту, ймовірно, впливає на ґрунтового доступність кремнію, тому що наявність кремнію є низьким у кислих ґрунтах.

Одним з важливих властивостей полікремнієвих кислот є їх участь в направленому каталітичному синтезі органічних речовин в якості каталізатора. Силікагель є не тільки адсорбентом, а й каталізатором реакції конденсації ацетальдегіду, яка при кімнатній температурі і нормальному тиску за відсутності силікагеля не відбувається. Реакція конденсації ацетальдегіду йде з утворенням зв'язку C = C. Відомо, що кремнієва кислота може утворювати розчинні комплекси з органічними і неорганічними лігандами [11]. У наших роботах [12] теж встановлена певна залежність у мінімумах та максимумах вмісту гумусу та загального кремнію. Коефіцієнт кореляції становить 0,84, що характеризується як високий.

Вкрай мало інформації про розчинні форми кремнію в тканинах рослин. Проте, наявні дані вказують на можливість безпосередньої участі Si в метаболізмі рослин. Тому науковий інтерес представляє обґрунтування високоефективних прийомів використання кремнію для підвищення врожаю сільськогосподарських культур, а також розробка нових високоефективних екологічно безпечних засобів, саме на техногенно-порушених ґрунтах, де основною метою є відновлення їх якості та повернення у сільськогосподарське використання.

Метою досліджень було встановлення ролі кремнієвих сполук при вирощуванні злакових, бобових та олійних культур на техногенно-порушених ґрунтах.

Методика дослідження. Відбір зразків ґрунтів проводився на дослідних ділянках науково-дослідного станіонару з рекультивациі земель Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету (м. Орджонікідзе, Дніпропетровська обл.), згідно ДСТУ 4287:2004. Для визначення оптимальної концентрації кремнієвмісних добрив, був закладений вегетаційний експеримент та проведені серії лабораторних дослідів з внесенням у ґрунти силікату натрію з діапазоном концентрацій від 0 % до 0,4 % (0 %, 0,1 %, 0,2 %, 0,3 %, 0,4 %). Усі експерименти проводились на базі науково-дослідної лабораторії гідроекології Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. Основним показником оцінювання була енергія проростання та біомаса однієї рослини з внесенням різних концентрацій силікату натрію у відношенні до поливу звичайною водою. Було обрано касети-розсадники з розміром касети 40×40×60 мм та усереднена проба ґрунту масою 30 г. Експеримент тривав 14 діб, полив проводився кожні 3 доби. Температура та вологість повітря підтримувалась у діапазоні 21–23°C та 50–70 % відповідно. Представниками незлакових зернових культур було обрано гречку, з зернобобових – вику, олійних – соняшник. Показник рН досліджуваних ґрунтів змінювався від 7,1 до 7,8, що характеризує ґрунти як слаболужні. Отримані дані було оброблено за допомогою програми Microsoft Excel 2010 та STATISTIKA 10.0.

Основні результати дослідження. У попередніх роботах було встановлено, що вміст загального кремнію змінюється від 52 % до 32 % з тенденцією зниження за глибиною [13], а кількість рухомих сполук кремнію змінюється від 6,4 до 13,4 мг/100 г, що свідчить про високий дефіцит цього елемента. Енергія проростання фіксувалась на 3 добу. У варіантах з водою, 0,1%, 0,2% розчинів Na_2SiO_3 вона складала більше 80 %. У варіанті з гречкою з додаванням 0,3% та 0,4% розчинів Na_2SiO_3 вона зменшувалась до 65–70 %, а з викою та соняшником до 72–75 %. Для зразків рослин, зібраних через 14 діб, розраховані середні значення, стандартні похибки, стандартні відхилення біомас гречки, вики та соняшника.

Гречка має високу фізіологічну здатність кореневої системи, яка за інтенсивністю поглинання поживних речовин з важкорозчинних сполук ґрунту переважає багато інших сільськогосподарських культур та є невибагливою до ґрунтів. Кожен варіант експерименту закладався восьмиразово. Встановлено, що найбільша оптимальна біомаса гречки на педоземі та на дерново-літогенних ґрунтах на лесоподібних суглинках була отримана при додаванні 0,2%-го розчину Na_2SiO_3 про що свідчить діаграма розмаху (рис. 1.). При додаванні 0,1%-го розчину Na_2SiO_3 ефект на обох типах техногенно-порушених ґрунтів був мало помітним та не давав значного росту біомаси [9]. Варіанти з 0,3%-ним та 0,4%-ним розчинами Na_2SiO_3 давали приріст біомаси гречки, але значно менший ніж 0,2%-ний розчин,

тому їх використання є економічно не вигідним. При використанні 0,2%-го кремнієвого нанопрепарату та його розведення навіть у 20 разів призводило до збільшення біомаси на 7–16 % [14]. Порівнюючи результати біомаси, можна зробити висновки, що педоземи на лесоподібному суглинку (середнє значення біомаси $0,1543 \pm 0,0045$ г – варіант з водою) є більш придатними для вирощування гречки, ніж дерново-літогенні ґрунти на лесоподібному суглинку (середнє значення біомаси $0,0855 \pm 0,0114$ г – варіант з водою). Збільшення біомаси рослин можливо пов'язано з особливістю рослин акумулювати велику кількість Si та використовувати його, як осморегулятор при дефіциті води [15], що призводить до покращення фотосинтетичної активності та діяльності антиоксидантних ферментів. Але у роботі А. О. Lavinsky [16] кремній був визнаний якісним елементом для підвищення врожайності рису, що було пов'язане зі збільшенням кількості зерна та маси 1000 зернин, але площа листків та біомаса рослини залишилась незмінною.

При внесенні кремнієвих сполук більш чутливими виявились дерново-літогенні ґрунти на лесоподібному суглинку, де середня біомаса рослини складала $0,2639 \pm 0,0174$ г, а на педоземі – $0,1964 \pm 0,0058$. Медіана та середнє значення не співпадають. Асиметрія $> 0,5$ є значимою на обох типах техногенно-порушених ґрунтів та правосторонньою, що свідчить про перевагу зустрічі значень більших, ніж середнє. Розраховані критерії асиметрії та ексцесу, які є меншими ніж 3 у

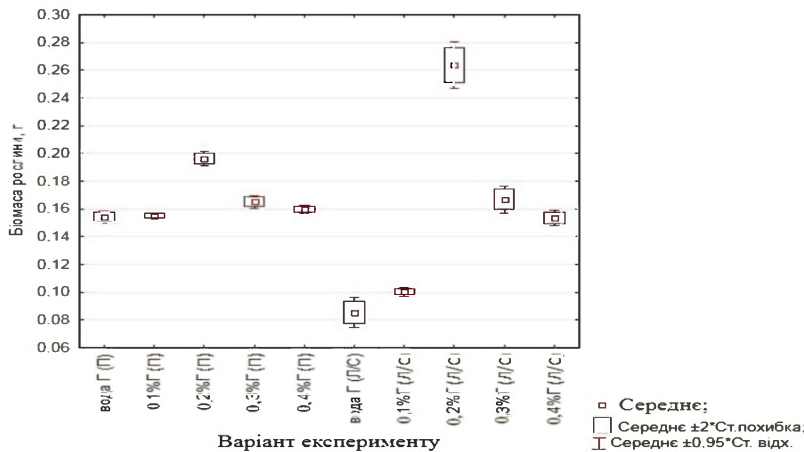


Рис. 1. Діаграма розмаху біомаси гречки на техногенно-порушених ґрунтах з додаванням кремнієвих добрив

Примітка. 0,1;0,2;0,3;0,4% - розчини Na_2SiO_3 ; Г- гречка (незлакові гречані), культура, яка вирощується; (П) – насипний шар чорнозему південного на лесоподібному суглинку; Л/С – дерново-літогенні ґрунти на лесоподібному суглинку

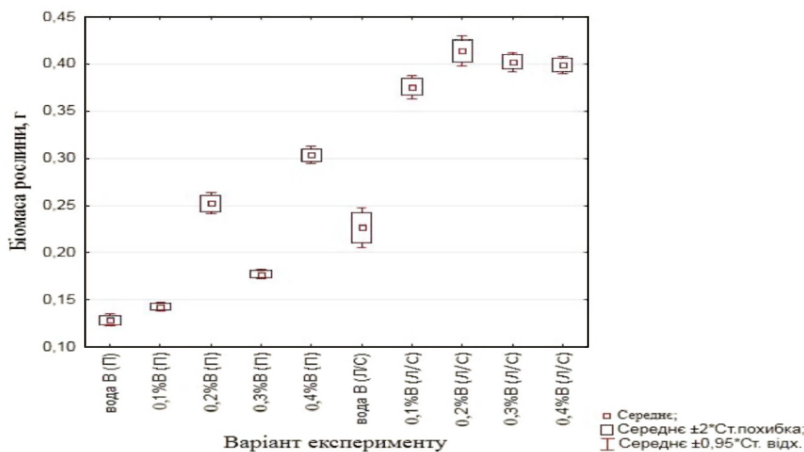


Рис. 2. Діаграма розмаху біомаси вики на техногенно-порушених ґрунтах з додаванням кремнієвих добрив

Примітка. 0,1;0,2;0,3;0,4% - розчини Na_2SiO_3 ; В – вика (бобові), культура, яка вирощується; (П) – насипний шар чорнозему південного на лесоподібному суглинку; Л/С – дерново-літогенні ґрунти на лесоподібному суглинку

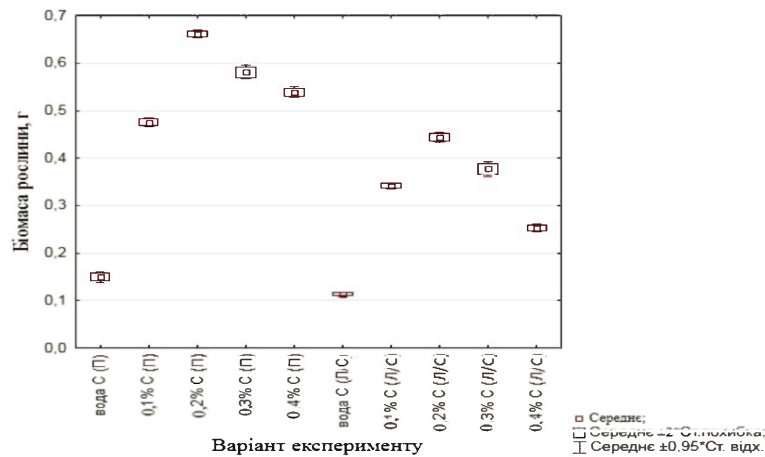


Рис. 3. Діаграма розмаху вирощування соняшнику на техногенно-порушених ґрунтах з додаванням кремнієвих добрив

Примітка. 0,1;0,2;0,3;0,4% - розчини Na_2SiO_3 ; С – соняшник (олійні), культура, яка вирощується; (П) – насипний шар чорнозему південного на лесоподібному суглинку; Л/С – дерново-літогенні ґрунти на лесоподібному суглинку

кожному експерименті, що дає можливість стверджувати про відсутність відмінностей між емпіричним і теоретичним нормальним розподілами [17].

Вика є вологолюбною культурою. Як сидерат цінується за скоростиглість. Добре реагує на внесення фосфатних та калійних добрив. Після розкладання в ґрунті біомаса вики стає легкозасвоюваним добривом. Має дренажні властивості, покращує структуру ґрунту, підвищує його пухкість і вологоємність. Покращує умови життєдіяльності ґрунтових мікроорганізмів і хробаків, при розкладанні служить їм кормом.

Експерименти при вирощуванні вики на техногенно-порушених ґрунтах показали цікаві результати. Усі варіанти з вирощування вики на дерново-літогенних ґрунтах на лесоподібних суглинках у 1,3–2,6 разів більше за біомасою, ніж у варіантах на педоземі. Було встановлено, що додавання розчинів 0,2- та 0,4%-ного метасилікату натрію у досліді на педоземах збільшує біомасу ($0,2522 \pm 0,0120$ та $0,3035 \pm 0,0097$ г), а внесення кремнієвих сполук у всіх варіантах при вирощуванні на дерново-літогенних ґрунтах на лесоподібних суглинках призвело до збільшення біомаси у 2 рази. Найбільше значення біомаси було зафіксоване у варіанті експерименту з додаванням 0,2%-го розчину Na_2SiO_3 , а подальше збільшення концентрації розчинів не давала кращих результатів. Розраховані критерії асиметрії та ексцесу, були меншими ніж 3 у кожному експерименті, що дає можливість стверджувати про відсутність відмінностей між емпіричним і теоретичним нормальним розподілами [17]. Ексцес був більше 0 у варіантах 0,2%- та 0,4%-них розчинів Na_2SiO_3 на всіх типах досліджуваних ґрунтів, асиметричність була неістотною.

Оптимізація кремнієвого живлення рослин призвела до збільшення маси коренів на 20–50 %, їх обсягу, загальної та робочої адсорбуючої поверхні і покращила кореневе дихання. Збільшилися вміст лігніну, кількість стручків на одну рослину і маса 1000 зерен [18].

Соняшник – культура інтенсивного мінерального живлення, вимоглива до запасів поживних речовин у ґрунті. Пришвидженню розвитку соняшнику і збільшенню врожайності сприяють мінеральні та органічні добрива. Вирощування соняшнику залежить від кількості тепла, вологи, типу ґрунтів та рівня мінерального живлення. Непридатними для соняшника є ґрунти легкого і важкого гранулометричного складу з високим вмістом вапна, а також сильно заболочені ґрунти. Показник рН досліджуваних ґрунтів є слаболужним.

Отримані дані про біомасу представлені на рис. 3. При вирощуванні соняшнику без внесення добрив досліджувани ґрунти проявили себе однаково. Біомаса соняшника на педоземах та на дерново-літогенних ґрунтах

ґрунтах склала $0,1495 \pm 0,0114$ та $0,1135 \pm 0,0044$ г відповідно. При внесенні кремнієвих сполук біомаса рослини збільшилася у 2-4 рази на дерново-літогенних ґрунтах на лесоподібному суглинку та у 4 рази на педоземах по відношенню до варіанта без внесення кремнієвих добрив. Проаналізувавши експерименти по відношенню до типів ґрунту встановлено, що більш придатними виявились педоземи на лесоподібному суглинку.

Варіант експерименту з 0,2%-м розчином Na_2SiO_3 виявився найефективнішим при вирощуванні соняшнику на всіх типах досліджуваних ґрунтів.

Асиметричність була неістотною на педоземі на лесоподібному суглинку та істотною на дерново-літогенних ґрунтах на лесоподібному суглинку. Розраховані критерії асиметрії та ексцесу, були меншими ніж 3 у кожному експерименті, що дає можливість стверджувати про відсутність відмінностей між емпіричним і теоретичним нормальним розподілами [17].

Висновки. Оптимальна концентрація натрій метасилікату для підвищення біомаси сільськогосподарських культур склала 0,2 %. За використання 0,3%-х та 0,4%-х розчинів натрію метасилікату біомаса вики збільшилась тільки у експерименті при вирощуванні на педоземах. При застосуванні розчинів Na_2SiO_3 з концентрацією більше 0,2 % виникає желеподібна плівка, на подолання якої у насіння не вистачає енергії проростання і розвиток рослини уповільнюється.

Збільшення біомаси у перші 14 діб пов'язане з адсорбуючою дією кремнію, який утримує воду та прискорює розвиток рослини. Встановлена неоднакова поведінка обраних культур на різних типах техногенно-порушених ґрунтів. Діаграма біомас є достатньо показовою для визначення найбільш ефективної концентрації кремнієвих сполук.

Література

- Lucas Y., Luizao F. J., Chauvel A., Rouiller J., Nahon D., 1993. The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soil. Sciencev. 260, p. 521-523.
- Sommer M., Kaczorek D., Kuzyakov, Y., Breuer J., 2006. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes: A review J Plant Nutr Soil Sci, 169(2006), pp. 310-329
- Sanglard, L. M.V.P., Detmann, K. C., Martins, S.C.V., Teixeira, R. A., Pereira, L. F., M. L., Sanglard, Fernie, A. R., Wagner L. Araújo, DaMatta F. M. The role of silicon in metabolic acclimation of rice plants challenged with arsenic. Environmental and Experimental Botany. Volume 123, March 2016, Pages 22-36.
- Матыченков И.В. Изучение взаимодействия кремниевых, фосфорных, азотных удобрений в системе почва-растение [Текст]: дисс.к.б.н./ И.В. Матыченков. – М., 2012. – 136 с.
- Воронков М.Г. Кремний и жизнь [Текст]/М.Г. Воронков, Г.И.Зелчан, А.Ю. Лукевич. – Рига.: Зинатне, 1978. – 587 с.
- Воронков М.Г. Кремний в живой природе [Текст] / М.Г. Воронков, И.Г. Кузнецов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 157 с.
- Матыченков В.В. Роль подвижных соединений кремния в растении-

ях и системе почва – растение [Текст]: Дисс. докт. биол. н.:2.03.2008/ В.В.Матыченков. – Пушчино, 2008. – 330 с.

8. Calatayud, P. A., Njuguna, E., Mwalusepo, S., Gathara, M., Okuku, G., Kibe, A., Musyoka, B., Ong'amo, G., Juma, G., Johansson, T., Subramanian, S., Gatebe, E., Le Ru, B., 2016. Can climate-driven change influence silicon assimilation by cereals and hence the distribution of lepidopteran stem borers in East Africa? *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Volume 224, 15 May 2016, Pages 95–103

9. Довгун В. Б., Янишевская О. Л. Урожай и качество льна-долгунца при применении кремнийсодержащих удобрений и кобальта // *Плодородие*. – 2007. – № 2. – С. 27–28.

10. Keller, C., Guntzer, F., Barboni, D., Labreuche, J., Meunier, J.-D., 2012. Impact of agriculture on the Si biogeochemical cycle: Input from phytolith studies. *Comptes Rendus Geoscience. Erosion–Alteration: from fundamental mechanisms to geodynamic consequences (Ebelmen's Symposium)*. Volume 344, Issues 11–12, November–December 2012, Pages 739–746

11. Tsujimoto, Y., Muranaka, S., Saito, K., Asai H., 2014. Limited Si-nutrient status of rice plants in relation to plant-available Si of soils, nitrogen fertilizer application, and rice-growing environments across Sub-Saharan Africa *Field Crops Res*, 155 (2014), pp. 1–9

12. Чорна В.І., Вагнер І.В. Дослідження вмісту загального кремнію у чорноземі звичайному та техноземі – SWorld – *International Scientific Journal*. – випуск 1(38). – том 24. – Івано-Франківськ: Маркова АД – 2015. С. 30–35

13. Чорна В.І., Вагнер І.В. Участь кремнієвих сполук та гумінових кислот у формуванні властивостей ґрунту. *Природне агропробудництво в Україні: проблеми становлення, перспективи*. – Дніпро – 2015. С.151–153

14. Забегалов Н.В., Дабахова Е.В. Влияние кремнийсодержащего нано-препарата на урожайность и содержание кремния в зерновых культурах: Земледелие и растениеводство. *Достижения науки и техники АПК*, №12. – 2011.С.22–24.

15. Kang, J., Zhao, W., Zhu X., 2016. Silicon improves photosynthesis and strengthens enzyme activities in the C3 succulent xerophyte *Zygophyllum xanthoxylum* under drought stress. *Journal of Plant Physiology*. Volume 199, 20 July 2016, Pages 76–86

16. Lavinsky A.O., Detmann K.C., Reis J.V., Avila R.T., Sanglard M.L., Pereira, L.F., Sanglard L. M., DaMatta F.M., 2016. Silicon improves rice grain yield and photosynthesis specifically when supplied during the reproductive growth stage. *Journal of Plant Physiology*. Volume 206, 1 November 2016, Pages 125–132

17. Siegel S., Castellan N.J. 1988. *Nonparametric statistics for the behavioral sciences*. 2nd edition. McGraw – Hill, New York. XXIII. – Pp. 399

18. Kuai, J., Sun, Y., Guo, C., Zhao, L., Zuo, Q., Wu, J., Zhou, G., 2016. Root-applied silicon in the early bud stage increases the rapeseed yield and optimizes the mechanical harvesting characteristics. *Field Crops Research*. Volume 200, January 2017, Pages 88–97

19. Eul-Su Choi, Sukweenadhi, J., Kim, Y.-Ju, Jung, K. H., Koh, S. C., Hoang, V.A., Yang, D. C., 2016. The effects of rice seed dressing with *Paenibacillus yonginensis* and silicon on crop development on South Korea's reclaimed tidal land. *Field Crops Research*. Volume 188, 1 March 2016, Pages 121–132

References

1. Lucas Y., Luizao F. J., Chauvel A., Rouiller J., Nahon D., 1993. The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soil. *Science*. 260, p. 521–523.

2. Sommer, M., Kaczorek, D. Kuzyakov, Y., Breuer J., 2006. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes: A review *J Plant Nutr Soil Sci*, 169 (2006), pp. 310–329

3. Sanglard, L.M.V.P., Detmann, K.C., Martins, S.C.V., Teixeira, R. A., Pereira, L. F.,

Sanglard, M.L., Fernie, A. R., Wagner L. Araujo, DaMatta F. M. The role of silicon in metabolic acclimation of rice plants challenged with arsenic. *Environmental and Experimental Botany*. Volume 123, March 2016, Pages 22–36.

4. Matychenkov I.V. *Izuchenie vzaimovlijanie kremnievyh, fosfornyh, azotnyh udobrenij v sisteme pochva-rastenie* [Текст]: diss.k.b.n./ I.V. Matychenkov. – M., 2014. – 136 s.

5. Voronkov M.G. *Kremnij i zhizn'*[Текст]/M.G. Voronkov, G.I.Zelchan, A.Ju. Lukevic. – Riga.: Zinatne, 1978. – 587 s.

6. Voronkov M.G., Zelchan G.I., Lukevic A.Ju. *Kremnij i zhizn'*. Riga, Zinatne, 1978, 578 s. Voronkov M.G., Kuznecov I.G. *Kremnij v zhivoj prirode* // Novosibirsk, Nauka: Sibirskoe otd., 1984,157 s.

7. Matychenkov V.V. *Rol' podvizhnyh soedinenij kremnija v rastenijah i sisteme pochva – rastenie* [Текст]: Diss. dokt. biol. n.:2.03.2008/ V.V.Matychenkov. – Pushchino, 2008. – 330 s.

8. Calatayud P. A., Njuguna E., Mwalusepo S., Gathara M., Okuku G., Kibe A., Musyoka B., Williamson D., Ong'amo G., Juma G., Johansson T., Subramanian S., Gatebe E., Le Ru B. 2016. Can climate-driven change influence silicon assimilation by cereals and hence the distribution of lepidopteran stem borers in East Africa? *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Volume 224, 15 May 2016, Pages 95–103

9. Довгун В.Б., Янишевская О.Л. Урожай и качество льна-долгунца при применении кремнийсодержащих удобрений и кобальта // *Плодородие*. – 2007. – № 2. – С. 27–28.

10. Keller, C., Guntzer, F., Barboni, D., Labreuche, J., Meunier, J.-D., 2012. Impact of agriculture on the Si biogeochemical cycle: Input from phytolith studies. *Comptes Rendus Geoscience. Erosion–Alteration: from fundamental mechanisms to geodynamic consequences (Ebelmen's Symposium)*. Volume 344, Issues 11–12, November–December 2012, Pages 739–746

11. Tsujimoto, Y., Muranaka, S., Saito, K., Asai H., 2014. Limited Si-nutrient status of rice plants in relation to plant-available Si of soils, nitrogen fertilizer application, and rice-growing environments across Sub-Saharan Africa *Field Crops Res*, 155 (2014), pp. 1–9

12. Чорна В.І., Вагнер І. В., 2015а. Дослідження вмісту загального кремнію у чорноземі звичайному та техноземі – SWorld – *International Scientific Journal*. – випуск 1(38). – том 24. – Івано-Франківськ: Маркова АД С. 30–35

13. Чорна В. І., Вагнер І. В., 2015б. Участь кремнієвих сполук та гумінових кислот у формуванні властивостей ґрунту. *Природне агропробудництво в Україні: проблеми становлення, перспективи розвитку*. – Дніпропетровськ. – С.151–153

14. Забегалов, Н.В., Дабахова, Е.В., 2011. Влияние кремнийсодержащего нано-препарата на урожайность и содержание кремния в зерновых культурах NTP: земледелие и растениеводство. *Достижения науки и техники АПК*, №12. стр.22–24.

15. Kang, J., Zhao, W., Zhu X., 2016. Silicon improves photosynthesis and strengthens enzyme activities in the C3 succulent xerophyte *Zygophyllum xanthoxylum* under drought stress. *Journal of Plant Physiology*. Volume 199, 20 July 2016, Pages 76–86

16. Lavinsky A. O., Detmann K. C., Reis, J. V., Avila R. T., Sanglard M. L., Pereira, L. F., Sanglard, L. M.V.P., Rodrigues, F. A., Araujo, W. L., DaMatta F. M., 2016. Silicon improves rice grain yield and photosynthesis specifically when supplied during the reproductive growth stage. *Journal of Plant Physiology*. Volume 206, 1 November 2016, Pages 125–132

17. Siegel S., Castellan N.J. 1988. *Nonparametric statistics for the behavioral sciences*. 2nd edition. McGraw – Hill, New York. XXIII. – Pp. 399

18. Kuai, J., Sun, Y., Guo, C., Zhao, L., Zuo, Q., Wu, J., Zhou, G., 2016. Root-applied silicon in the early bud stage increases the rapeseed yield and optimizes the mechanical harvesting characteristics. *Field Crops Research*. Volume 200, January 2017, Pages 88–97

19. Eul-Su Choi, Sukweenadhi, J., Kim, Y.-Ju, Jung, K. H., Koh, S. C., Hoang, V.A., Yang, D. C., 2016. The effects of rice seed dressing with *Paenibacillus yonginensis* and silicon on crop development on South Korea's reclaimed tidal land. *Field Crops Research*. Volume 188, 1 March 2016, Pages 121–132