



ВЛИЯНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО НАНОКРЕМНЕЗЕМА НА ПРОРАЩИВАНИЕ СЕМЯН ПШЕНИЦЫ В ТЕМНОВОМ РЕЖИМЕ КАК ОДИН ИЗ МЕТОДИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ БИОТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ МИКРОЗЕЛЕНИ

INFLUENCE OF HYDROTHERMAL NANOSILICA ON GERMINATION OF WHEAT SEEDS IN THE DARK MODE AS ONE OF THE METHODOLOGICAL ASPECTS OF BIOTECHNOLOGY FOR OBTAINING FUNCTIONAL PRODUCTS BASED ON MICROGREENS

В.Н.Зеленков^{1,2,3}, д.с.-х.н., проф., гл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0001-5481-2723), В.В.Латушкин¹, к.с.-х.н., вед. науч. сотр., (ORCID: 0000-0003-1406-8965), В.В.Потапов⁴, д.т.н., проф., гл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0001-6959-3324), М.И.Иванова³, д.с.-х.н., проф. РАН, гл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0001-7326-2157), Б.И.Сандухадзе⁵, д.с.-х.н., акад. РАН, проф., гл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0003-1406-8965), П.А.Верник¹, директор института (ORCID: 0000-0001-5850-7654) / zelenkov-raen@mail.ru

V.N.Zelenkov^{1,2,3}, *Doct. of Sc. (Agriculture)*, Prof., Senior Researcher, B.I.Sanduhadze⁴, *Doct. of Sc. (Agriculture)*, Academician of RAS, Senior Researcher, V.V.Latushkin¹, *Cand. of Sc. (Agriculture)*, Leading Researcher, V.V.Potapov⁴, *Doct. of Sc. (Technical)*, Prof., Chief Researcher, M.I.Ivanova³, *Doct. of Sc. (Agriculture)*, Prof., Senior Researcher, B.I.Sanduhadze⁵, *Doct. of Sc. (Agriculture)*, Academician of RAS, Prof., Senior Researcher, P.A.Vernik¹, Institute Director

10.22184/1993-8578.2020.13.5.284.297

Получено: 6.08.2020 г.

Исследование посвящено изучению некоторых нанотехнологических аспектов применения гидротермального нанокремнезема для получения нового функционального продукта питания – микрозелени растений (на примере озимой пшеницы). В методическом плане поднимается вопрос об использовании этапа получения пророщенных семян выращивания микрозелени с помощью нанобиотехнологий в темновом варианте без дополнительного искусственного освещения. Обработка семян гидротермальным нанокремнеземом в концентрациях 0,1 и 0,01% способствовала увеличению всхожести семян на 5–6%, средней высоты ростков (микрозелени) на 11,3–11,9%, биомассы растений на 11,0% (0,1%-ный раствор) и 17,6% (0,01%). Более низкие концентрации (0,001

¹ Автономная некоммерческая организация "Институт стратегий развития", Москва, Россия / Independent NPO Institute for Socio-Economic Strategies and Development Technologies (Institute for Development Strategies), Moscow, Russia.

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений", Москва, Россия / All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, Moscow, Russia.

³ Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный научный центр овощеводства" (ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО), Московская область, Раменский район, д. Верея, Россия / All-Russian Scientific Research Institute of Vegetable Growing – the branch of FSBSI "Federal Scientific Center of Vegetable Growing, Moscow region, Russia.

⁴ ФГБНУ Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН Петропавловск-Камчатский, Россия / Far Eastern Branch of the RAS, FSBSI "Research Geotechnological Center".

⁵ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр "Немчиновка". / FSBSI Federal research center "Nemchinovka", Moscow region, Russia.



и 0,0001%) мало влияли на изменение посевных свойств семян и рост сеянцев, высокие (1%) оказывали отрицательное воздействие (всхожесть снижалась на 4%, а высота ростков на 14%). Показано, что для повышения всхожести семян на первых этапах при выращивании микрозелени озимой пшеницы в темновом режиме без дополнительного подсвечивания перспективно использование гидротермального нанокремнезема для обработки семян в концентрации 0,01%, а также 0,1%. Обработка нанокремнеземом с разными концентрациями приводит к возрастанию накопления кремния в ростках в 1,5–2 раза по сравнению с контролем. Содержание фосфора, серы, магния, натрия в ростках оставалось относительно стабильным. Содержание кальция возрастало в варианте использования кремнезема 0,01% концентрации, калия – в варианте 0,0001%. Отмечено повышение содержания цинка и меди при обработке семян пшеницы водными золями нанокремнезема в варианте 0,001%.

The research is devoted to study certain nanotechnological aspects of hydrothermal nanosilica applications for obtaining a new functional food product called microgreens (as exemplified by winter wheat). In terms of methodology a question is raised concerning use of the stage when the seeds germinate for further growth of microgreens with the aid of nanotechnologies in a dark mode without additional artificial lightning. Treatment of seeds with hydrothermal nanosilica at concentrations of 0.1% and 0.01% contributed to an increase in seed germination by 5–6%, the average sprout height (microgreens) by 11.3–11.9% and plant biomass by 11.0% (0.1% solution) and 17.6% (0.01%). The lower concentrations (0.001% and 0.0001%) had little effect on the change in the sowing properties of seeds and the growth of seedlings while the higher concentrations (1%) produced a negative effect (germination decreased by 4%, and the height of sprouts by 14%). It has been shown that for improving seed germination at the first stages, when growing microgreens of winter wheat in the dark mode without additional illumination, it is promising to use hydrothermal nanosilica for seed treatment at a concentration of 0.01%, as well as 0.1%. Treatment with nanosilica at different concentrations leads to the higher accumulation of silicon in the sprouts by 1.5–2 times compared to the control samples. The content of phosphorus, sulfur, magnesium and sodium in the sprouts remained relatively stable. The calcium content increased in the case of using silica of 0.01% concentration, potassium – in the case of 0.0001%. An increase in the content of zinc and copper was noted during the treatment of wheat seeds with aqueous sols of nanosilica in the variant 0.001%.

INTRODUCTION

In recent years the kinds of food products for human consumption have expanded. Consumers are looking for new healthy food products combined with exquisite taste [1–2]. Microgreens and germinated seeds present a new class of functional foods, a modern superfood, which represents young sprouts of vegetables and herbs, and young and tender leafy greens [3, 4]. One of the easiest and fastest ways to produce biologically valuable products for use in food is by germinating seeds [5]. Sprouted seeds have colossal nutritional value and contain a high

concentration of vitamins, minerals, proteins, enzymes and antioxidants [6–8]. Seedlings also contain sulforaphane, isothiocyanates, glucosinolates, enzymes, antioxidants, vitamins that are effective in cancer prevention or cancer therapy [9–11]. The composition of seeds changes significantly during germination [12]. Nutrients are broken down into simpler and more easily digestible forms, the biological value of proteins increases, the activity of enzyme inhibitors decreases resulting in better digestibility of food by the organism. In general, the content

of phytochemical compounds in seedlings is higher than in plants in a state of technical ripeness. The content of protein, vitamins, enzymes, minerals and microelements increases from 300 to 1,200% [13]. The most popular are sprouts of alfalfa, broccoli, buckwheat, clover, mung bean, mustard, radish, red cabbage, soybeans, etc. [14]. In Japan, seedlings grown in the light are consumed raw; those grown in the dark are heat-treated.

Sprouted grains (seeds) can be used not only for human consumption, but also as animal feed. Hydroponics allows to get



ВВЕДЕНИЕ

В последние годы расширяются виды продукции для использования в пищу человека. Потребители ищут новые продукты здорового питания в сочетании с изысканным вкусом [1-2]. Микрозелень и пророщенные семена – новый класс функциональных продуктов, современный суперпродукт, представляет собой молодые ростки овощей и трав, молодую и нежную листовую зелень [3, 4]. Одним из самых простых и быстрых способов производить биологически ценные продукты для использования в пище является проращивание семян [5]. Пророщенные семена обладают колоссальной питательной ценностью и содержат высокую концентрацию витаминов, минералов, белков, ферментов и антиоксидантов [6-8]. Также проростки содержат сульфорафан, изотиоцианаты, глюкозинолаты, ферменты, антиоксиданты, витамины, которые эффективны в профилактике рака, или в терапии против рака [9-11]. Состав семян существенно изменяется во время прорастания [12]. Питательные вещества расщепляются на более простые и легкоусваиваемые формы, биологическая ценность белков повышается, активность ингибиторов ферментов снижается, в результате чего повышается усвояемость пищи организмом. В целом содержание фитохимических соединений в проростках выше, чем в растениях в состоянии технической спелости. Содержание белка, витаминов, ферментов,

минеральных веществ и микроэлементов увеличивается от 300 до 1200% [13]. Наиболее популярными являются проростки люцерны, брокколи, гречихи, клевера, маша, горчицы, редиса, капусты краснокочанной, сои и др. [14]. В Японии проростки, выращенные на свету, потребляют в сыром виде, в темноте – подвергают термообработке.

Пророщенное зерно (семена) может использоваться не только в пищу для человека, но и в качестве корма для животных. Гидропоника позволяет круглогодично получать в короткие сроки качественную продукцию для обогащения рационов с.х. животных [15-18]. Первые несколько дней прорастания (до наступления фотосинтеза) происходит изменение биохимического состава, прежде всего потеря сухого вещества исходного зерна и биотрансформация белков, жиров и углеводов. Фотосинтез начинается примерно на пятый день, когда активизируются хлоропласты и наступает период накопления сухого вещества в зеленой массе.

Другой вид функциональных продуктов, микрозелень, также приобретает все большую популярность в качестве нового кулинарного ингредиента, который обеспечивает интенсивный вкус, яркие цвета и свежую текстуру при добавлении в салаты и другие пищевые продукты [19-21]. Микрозелень предложена в качестве идеальной пищи для людей на растительной диете, таких как веганы или вегетарианцы, и даже для членов космического экипажа из-за

high-quality products in a short time and all year round so as to enrich agricultural rations of farm animals [15-18]. In the first few days of germination (before the onset of photosynthesis), there is a change in biochemical composition, primarily a loss of dry matter of the original grain and biotransformation of proteins, fats and carbohydrates. Photosynthesis begins on about the fifth day, when chloroplasts are activated, and a period of accumulation of dry matter in the green mass commences.

The other functional food – microgreens – is also

gaining popularity as a new culinary ingredient that provides intense flavor, vibrant colors and fresh texture when added to salads and other foods [19-21]. Microgreens have been suggested as an ideal food for people on a plant-based diet, such as vegans or vegetarians, and even for space crew members because of their limited access to a variety of foods [22].

Microgreens are harvested at the first true stage of leaf growth at the age of 7-21 days and a plant height of 5-10 cm, when cotyledon leaves with the first true leaf are fully formed

[23-25]. The functionality of microgreens is explained by the high content of vitamins and minerals as well as other biologically active compounds. Many types of microgreens have been reported to contain more micronutrients than full-grown plants. Thus, the level of accumulation of vitamins and minerals can exceed mature vegetables by more than 40 times [23, 25]. The microgreens in their metabolic cycle contain vitamins or their precursors, carotenoids, ascorbic acid, tocopherols and tocotrienols, phylloquinone and folate, etc.



их ограниченного доступа к разнообразной еде [22].

Урожай микрозелени собирают на первой истинной стадии роста листьев в возрасте 7–21 суток при высоте растений 5–10 см в высоту, когда полностью сформированы семядольные листочки с первым настоящим листом [23–25]. Функциональность микрозелени объясняется высоким содержанием витаминов и минералов, а также других биологически активных соединений. Сообщалось, что многие виды микрозелени более насыщены микроэлементами, чем полновозрастные растения. Так, уровень накопления витаминов и минералов может превышать зрелые овощи более чем в 40 раз [23, 25]. Из витаминов или их предшественников в метаболическом цикле в микрозелени содержатся каротиноиды, аскорбиновая кислота, токоферолы и токотриенолы, филлохинон и фолат и др. [26–31]. Другие фитохимические вещества с высоким содержанием в микрозелени включают хлорофилл, фенольные соединения, антоцианы и глюкозинолаты [26, 31, 32]. Другой важный аспект заключается в высокой антиоксидантной активности микрозелени [32]. В овощах содержится целый ряд веществ-антиоксидантов, и достаточно трудно оценить вклад каждого компонента. Поэтому измерение общей антиоксидантной способности (совокупная способность пищевых компонентов поглощать свободные радикалы) является эффективным способом оценки потенциальной пользы различных

овощей в профилактике или лечении хронических заболеваний [33].

Основные факторы производства микрозелени, температура и влажность, как правило, легко управляются в контролируемых средах по сравнению с открытым грунтом [34]. На коммерческие цели микрозелень, как правило, выращивают в системах без почвы, в которых грунт заменяется подложкой, или в которых культивирование происходит в жидкой среде с питательным раствором [35]. Важно подчеркнуть, что для выращивания микрозелени необходимо наличие адекватного уровня светового излучения (при плотности потока фотонов ФАР не менее $100 \text{ мкмоль/м}^2 \cdot \text{с}$) [36, 37]. В то же время проращивание семян возможно без света [35]. Экспериментальное изучение прорастания семян и роста растений в контролируемых условиях позволяет более точно оценить вклад разных факторов [38]. Одним из перспективных направлений улучшения прорастания семян в контролируемых средах является использование регуляторов роста растений, в частности, наноразмерных форм кремнезема [39]. К сожалению, объем исследований по данному направлению в настоящее время недостаточен.

Целью представленной работы являлась проверка методического подхода по использованию наночастиц гидротермального кремнезема в предпосевной обработке семян растений на примере пшеницы как фактора регулирования развития растений на стадии

[26–31]. High amounts of other phytochemicals in microgreens include chlorophyll, phenolic compounds, anthocyanins, and glucosinolates [26, 31, 32]. Another important aspect concerns high antioxidant activity of microgreens [32]. Vegetables contain a variety of antioxidant substances, and it is difficult to assess the contribution of each component. Therefore, measuring the total antioxidant capacity (the combined ability of food components to scavenge free radicals) is an effective way to assess the potential benefits

of various vegetables in the prevention or treatment of chronic diseases [33].

The main factors of microgreen production, temperature and humidity, are generally easier to manage in controlled environments compared to open field [34]. For commercial purposes, microgreens are usually grown in soilless systems where the soil is replaced by a substrate, or where cultivation takes place in a liquid medium with a nutrient solution [35]. It is important to emphasize that growing microgreens requires an

adequate level of light radiation (at a photon flux density of PAR not less than $100 \text{ }\mu\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$) [36, 37]. At the same time, seed germination is possible without light [35]. Experimental studies of seed germination and plant growth under controlled conditions make it possible to more accurately assess the contribution of various factors [38]. One of the promising directions for improving seed germination in controlled environments is the use of plant growth regulators, in particular, nanosized forms of silica [39]. Unfortunately, the amount of



темнового проращивания семян для последующего использования в технологиях получения микрозелени.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования: пшеница озимая Московская 56 селекции ФИЦ "Немчиновка" (Москва).

Проращивание семян проводили в темноте согласно ГОСТ 12038-84 с изменениями: вместо фильтровальной бумаги использовали подложку из минеральной ваты. Энергию прорастания определяли на третьи сутки после посева семян, всхожесть – на седьмые сутки. Использовали в каждом варианте опыта по 100 шт. семян пшеницы, повторность трехкратная. Масса 100 семян пшеницы Московская 56, использованных для посева, составляла 5,2 г. Полив проводили дистиллированной водой по мере подсыхания подложки. Температура 23–24 °С. Предпосевную обработку наночастицами гидротермального кремнезема проводили путем замачивания семян в течение двух часов в дистиллированной воде (контроль) и в водных золях гидротермального нанокремнезема (ГНК) разных концентраций. В работе использовали рабочий водный золь ГНК концентрации 1,0%, который готовили заранее разбавлением дистиллированной водой водного 37,5%-ного концентрата ГНК, полученного методами ультрафильтрации в ООО "Наносилика"

(г. Петропавловск-Камчатский) из гидротермального теплоносителя скважины Мутновской ГеоЭС [40]. Перед началом экспериментов из рабочего золя ГНК готовили на дистиллированной воде золи ГНК концентраций 0,1, 0,01, 0,001 и 0,0001%. Определение содержания химических элементов в семенах проводили методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на рентгеновском спектрометре S8 Tiger, Bruker (Германия). Порядок приготовления образцов растений к РФА следующий: измельчение в агатовой ступке; взятие навески – 0,5 г; прессование таблетки-излучателя из навески растения на подложке из борной кислоты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Использованные в эксперименте для получения микрозелени семена озимой пшеницы обладали высокими посевными свойствами – энергия прорастания и всхожесть в контрольном варианте составили 88%. Тем не менее, обработка гидротермальным нанокремнеземом (ГНК) в концентрациях 0,1 и 0,01% способствовала увеличению всхожести на 5–6% (рис.1). Более низкие концентрации ГНК 0,001 и 0,0001 мало влияли на изменение посевных свойств семян. При высоких концентрациях нанокремнезема (порядка 1%, что выходит за пределы рекомендуемых для обработки сельскохозяйственных культур концентраций) всхожесть снижалась на 4%. Таким образом, для повышения всхожести семян при выращивании микрозелени озимой пшеницы

research in this area is currently insufficient.

The aim of this work was to test the methodological approach to the use of nanoparticles of hydrothermal silica in the pre-sowing treatment of plant seeds, as exemplified by wheat, as a factor for regulating plant development at the stage of dark germination of seeds for subsequent use in the technologies for obtaining microgreens.

MATERIALS AND METHODS

The research object: winter wheat Moskovskaya 56 selected

by the Federal Research Center "Nemchinovka" (Moscow). Seeds were germinated in dark according to GOST 12038-84 as amended: instead of filter paper, a mineral wool substrate was used. Germination energy was determined on the 3rd day after sowing the seeds, germination – on the 7th day. In each test variant we used 100 pcs of wheat seeds with the three-fold replication. The mass of 100 seeds of wheat Moskovskaya 56 used for sowing was 5.2 g. Irrigation was carried out with distilled water as the substrate dried up. The temperature was

23–24 °С. Presowing treatment with nanoparticles of hydrothermal silica was carried out by soaking seeds for 2 hours in distilled water (control) and in aqueous sols of hydrothermal nanosilica (HNS) of different concentrations. In our work we used a working aqueous sol of the GOC at a concentration of 1.0%, which was prepared in advance by diluting with distilled water an aqueous 37.5% concentrate of the GOC, obtained by ultrafiltration methods at Nanosilika LLC (Petropavlovsk-Kamchatsky) from the hydrothermal coolant

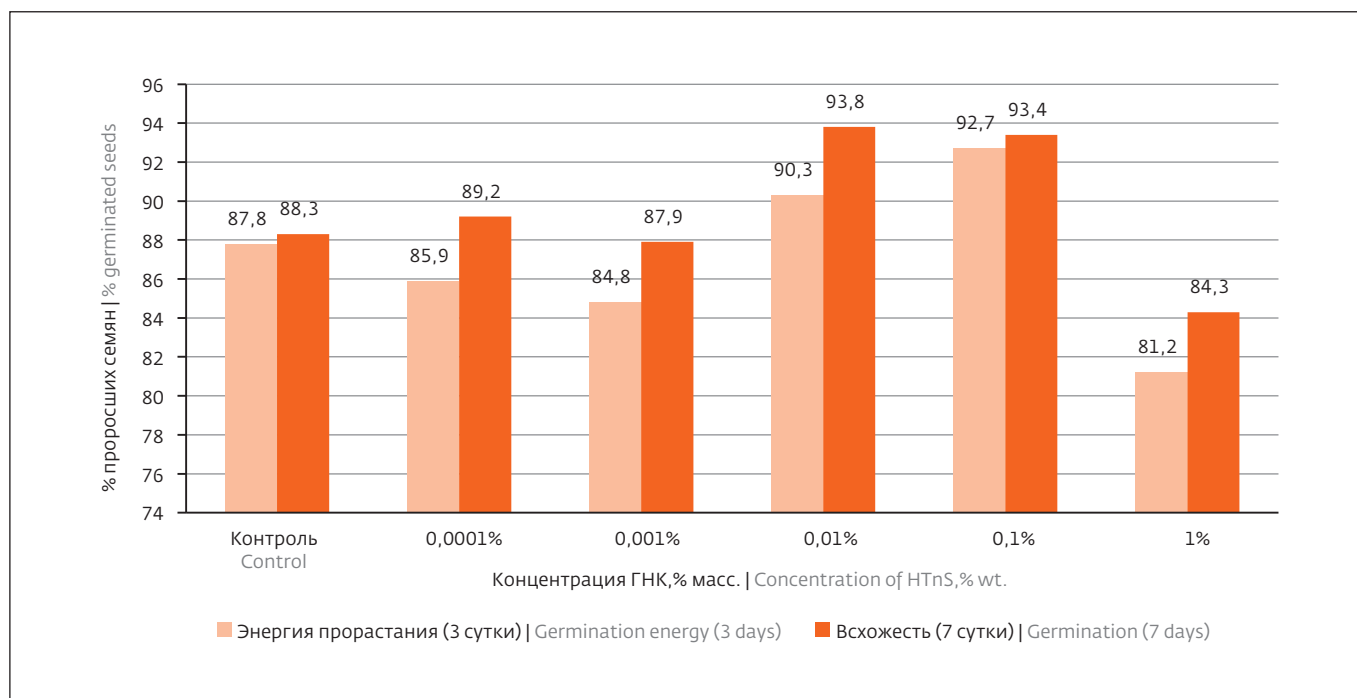


Рис.1. Влияние концентрации гидротермального нанокремнезема на прорастание семян озимой

Fig.1. Effect of the concentration of hydrothermal nanosilica on seed germination of Moskovskaya 56 winter wheat

перспективно использовать гидротермальный нанокремнезем в концентрациях 0,1 и 0,01%.

Дальнейшее проращивание семян в эксперименте показало, что происходит быстрый рост растений в период от трех до семи суток. На седьмые сутки проращивания средняя высота ростков пшеницы увеличилась на 11,9%

по сравнению с контролем при концентрации ГНК 0,01%, и на 11,3%, а при концентрации ГНК 0,1% – на 10,6%, при концентрации ГНК 0,001% различия с контролем статистически достоверны (рис.2). Обработка ГНК в концентрации 0,0001% практически не влияет на высоту ростков (разница с контролем статистически

of the Mutnovskaya GeoPP well [40]. Before the start of the experiments, the HOC sols were prepared using distilled water in HOC sols at concentrations of 0.1%, 0.01%, 0.001% and 0.0001%. Determination of the content of chemical elements in seeds was carried out by X-ray fluorescence analysis (XRF) with the aid of S8 Tiger X-ray spectrometer, Bruker (Germany). The procedure for preparing plant samples for XRF is as follows: grinding in an agate mortar; taking a sample – 0.5 g; pressing a tablet-emitter from a plant sample on a boric acid substrate.

RESULTS AND DISCUSSION

The seeds of winter wheat used in the experiment to obtain microgreens had high sowing properties – the germination energy and germination capacity in the control variant were 88%. Nevertheless, treatment with hydrothermal nanosilica (HNS) at concentrations of 0.1%, 0.01% contributed to an increase in germination by 5–6% (Fig.1). The lower concentrations of HOC 0.001% and 0.0001 had little effect on the change in the sowing properties of seeds. At high concentrations of nanosilica (about 1%, which is beyond the

recommended concentrations for the treatment of agricultural crops), the germination rate decreased by 4%. Thus, the use of hydrothermal nanosilica in concentrations of 0.1% and 0.01% is promising to increase seed germination when growing microgreens of winter wheat.

Further germination of seeds in the experiment showed that there is a rapid growth of plants in the period from 3 to 7 days. On the 7th day of germination, the average height of wheat germs increased by 11.9% compared to the control at a concentration of GNK of 0.01%,

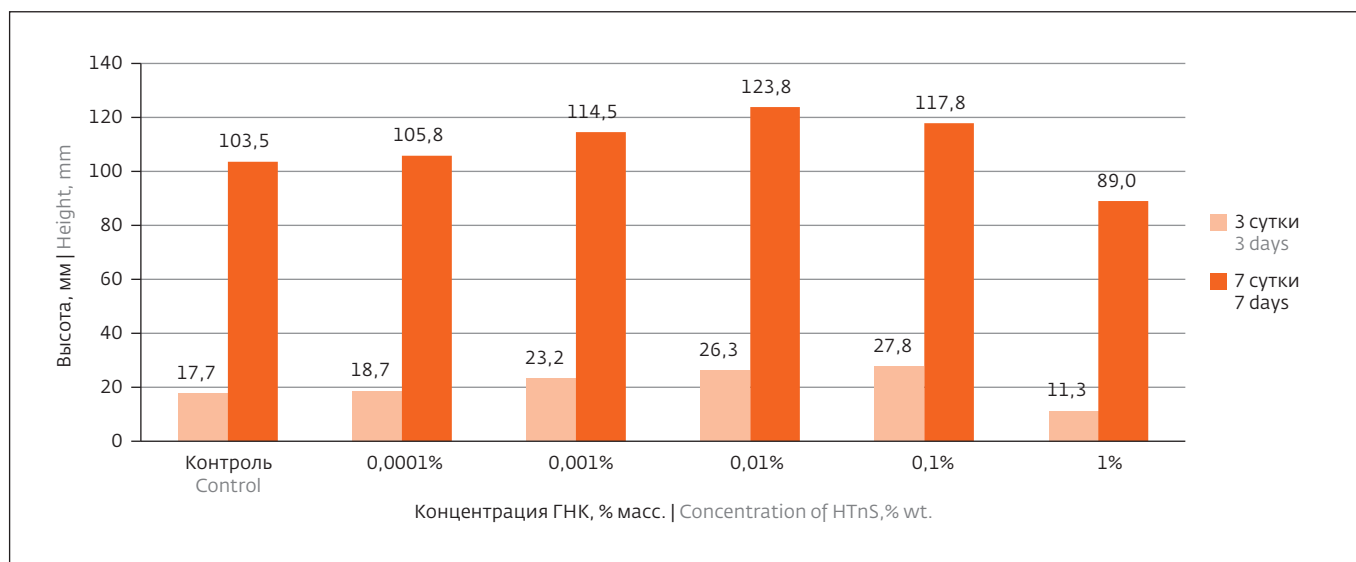


Рис.2. Влияние концентрации гидротермального кремнезема на среднюю высоту ростков озимой пшеницы Московская 56 на третьи и седьмые сутки проращивания. $HCP_{05} = 3,1$ см

Fig.2. Effect of the concentration of hydrothermal silica on the average sprout height of Moskovskaya 56 winter wheat on the 3rd and 7th days of germination. $HCP_{05} = 3.1$ cm

недостоверна). 1,0%-ная концентрация ГНК приводит к ослаблению роста растений на 14%. Таким образом, по параметру увеличения высоты ростков при выращивании микрозелени озимой пшеницы необходимо использовать гидротермальный нанокремнезем в диапазоне концентраций 0,1–0,001%.

Измерение средней массы 100 ростков в конце периода проращивания (на седьмые сутки) показало (рис.3), что статистически

достоверное повышение массы ростков наблюдалось в вариантах 0,1 и 0,01% на 11,0 и 17,6% соответственно. При обработке ГНК в других концентрациях, масса 100 ростков практически не отличалась от контроля. Таким образом, для интенсификации производства микрозелени пшеницы эффективна обработка ГНК в концентрациях 0,1 и 0,01%.

Таким образом, по всем изученным показателям (всхожесть семян, высота растений и

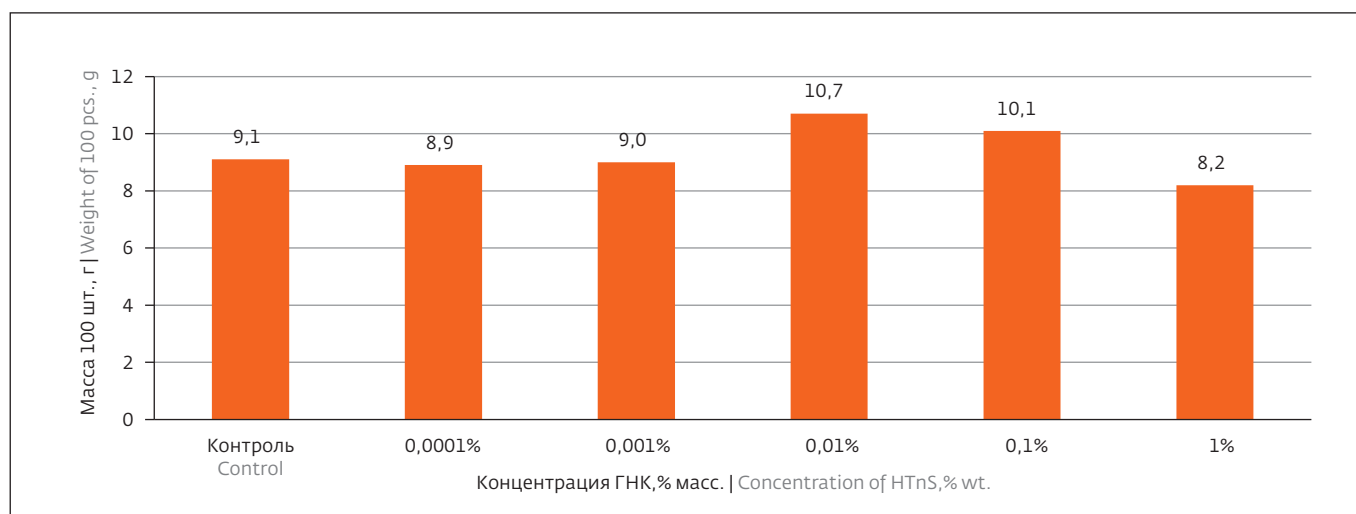


Рис.3. Влияние концентрации гидротермального кремнезема на массу 100 ростков озимой пшеницы Московская 56 на седьмые сутки проращивания. $HCP_{05} = 0,55$ см

Fig.3. Effect of the concentration of hydrothermal silica on the weight of 100 sprouts of winter wheat Moskovskaya 56 on the 7th day of germination. $HCP_{05} = 0.55$ cm

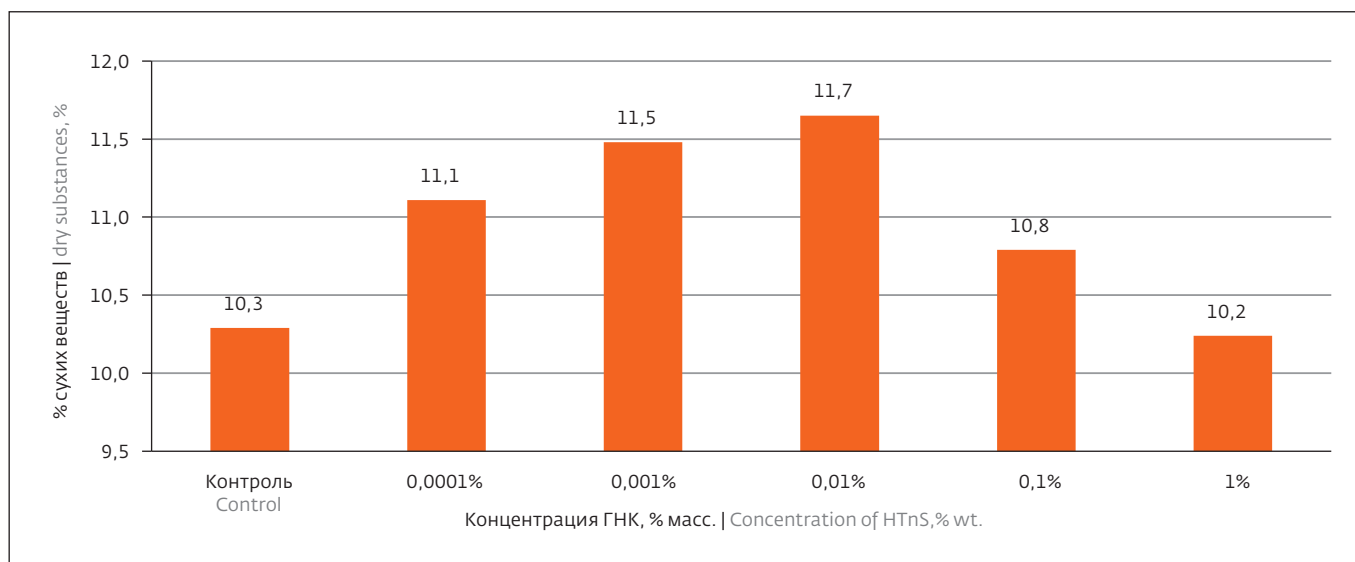


Рис.4. Влияние концентрации гидротермального кремнезема на содержание сухих веществ в ростках (надземной массе) озимой пшеницы Московская 56 на седьмые сутки проращивания

Fig.4. Effect of the concentration of hydrothermal silica on the dry matter content in the sprouts (aboveground mass) of Moscowvskaya 56 winter wheat on the 7th day of germination

биомасса 100 ростков) лучшим является вариант концентрации ГНК 0,01%, несколько уступает ему вариант 0,1%-ной концентрации. Обработка ГНК в концентрации 0,0001% практически не влияет на всхожесть и рост растений. При концентрации 0,001% рост растений озимой пшеницы активизируется, но в меньшей степени, чем при концентрациях 0,1-0,01%.

Обработка ГНК влияет не только на параметры роста озимой пшеницы, но также приводит к изменению химического состава. При оптимальной для прорастания семян концентрации ГНК (0,01%) в надземной массе отмечается также максимальное накопление сухих веществ (рис.4). Отметим, что в варианте 0,1%, также благоприятном для роста растений, повышения содержания сухих веществ по сравнению с контролем отсутствует. В то же время при обработке ГНК 0,0001% ростовые процессы не ускорились, однако накопление сухих веществ усиливалось. Это еще раз говорит о необходимости учитывать не один, а комплекс параметров при оценке эффективности того или иного препарата, содержащего наночастицы, в частности, ГНК. Даже такая невысокая концентрация, не оказавшая видимого влияния на ростовые процессы, приводила к изменению химического состава.

Для оценки изменения элементного состава семян и ростков при обработке

гидротермальным нанокремнеземом в разных концентрациях проведен комплекс исследований методом рентгенофлуоресцентного анализа. Обработка семян кремнийсодержащим препаратом (ГНК) проводилась путем 2-часового замачивания в растворе препарата соответствующей концентрации.

Обработка ГНК с разными концентрациями приводит к возрастанию концентрации кремния в ростках в 1,5-2 раза по сравнению с контролем (рис.5). Характерно, что посев семенами, обработанными 1,0% ГНК, не приводит к заметному повышению накопления элемента в проростках пшеницы, хотя в семенах после 2-часового замачивания в растворе ГНК данной концентрации отмечен практически 4-кратный рост содержания кремния. В вариантах 0,01...0,0001% ГНК самое высокое накопление Si в эксперименте. Содержание фосфора, серы, магния, натрия в ростках (надземной части растений) при обработке нанокремнеземом и в контроле оставалось относительно стабильным, не зависящим от обработки семян водными золями ГНК разных концентраций (рис.5). Содержание кальция возрастало в варианте использования 0,01% ГНК, калия - в варианте применения 0,0001% ГНК.

Из микроэлементов в наибольших количествах в ростках накапливаются цинк и марганец. Содержание цинка и меди повышается при

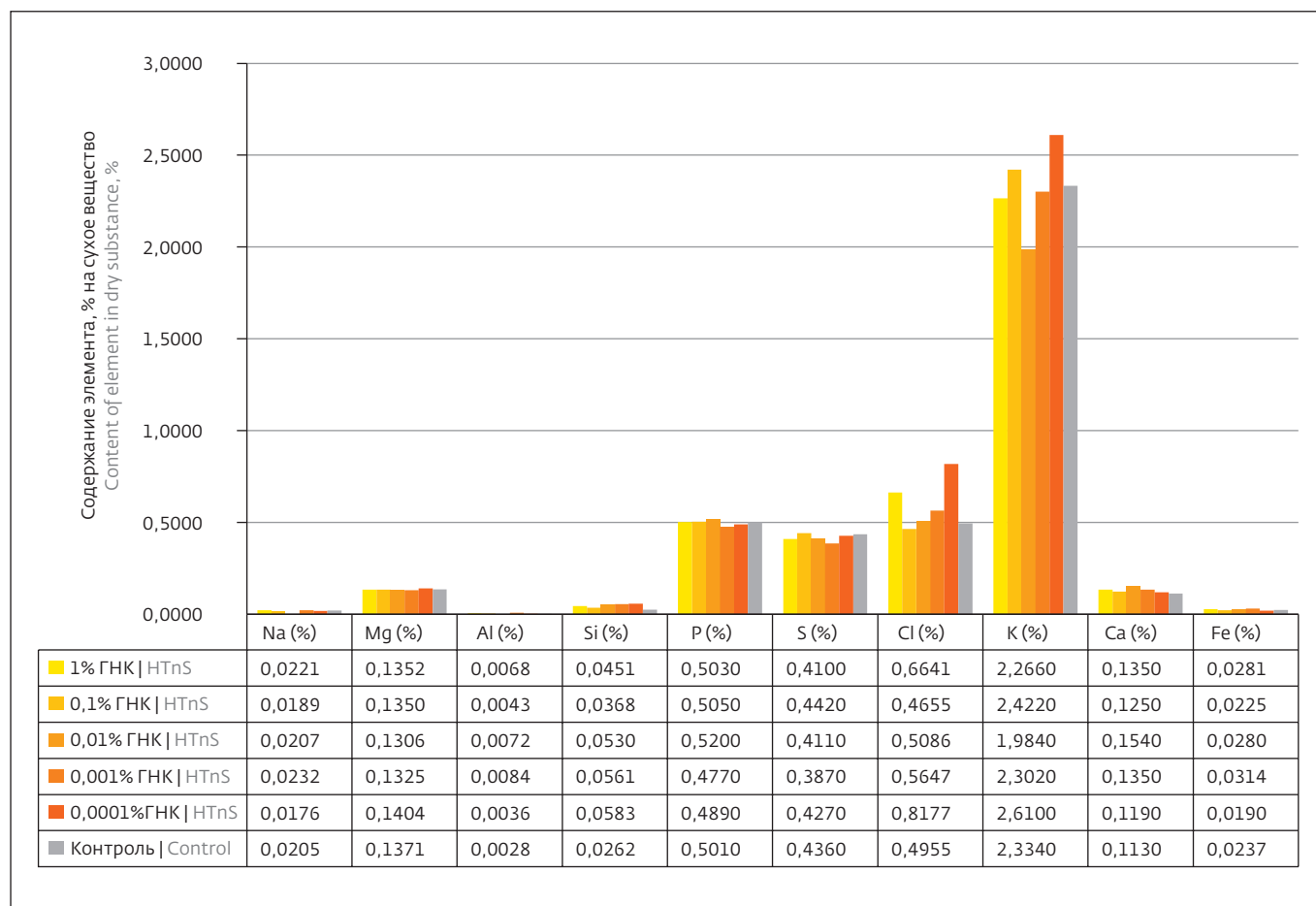


Рис.5. Содержание макроэлементов в ростках (надземной части) пшеницы при обработке ГНК в разных концентрациях, % на сухое вещество на седьмые сутки проращивания

Fig.5. Content of macronutrients in the sprouts (above ground part) of wheat when treated with GNC in different concentrations, % on dry matter on the 7th day of germination

обработке семян пшеницы водными золями ГНК в варианте концентрации 0,001% (рис.6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность разработки продуктов функционального питания для человека ставит перед наукой вопросы разработки новых технологий их производства. Микрозелень – перспективный вид продукции аграрного сектора экономики, отличающийся не только высокой биологической ценностью, но и снижением технологических затрат на производство. Однако подходы к разработке современных технологий получения микрозелени существенно отличаются от традиционных, так как сбор урожая производится на самых ранних этапах онтогенеза и физиологические основы формирования продукции отличаются от взрослых растений. В этом аспекте перспективно использование

нанобиотехнологий, в частности, применение наноразмерных форм кремния природного происхождения. В работе получены новые данные по оценке влияния гидротермального нанокремнезема на посевные свойства, продуктивность и химический состав растений озимой пшеницы на стадии микрозелени при проращивании в темновом режиме, что исключает затраты на искусственное освещение. При таких условиях не происходит активного фотосинтеза и накопления ассимилянтов, микрозелень формируется за счет метаболических изменений запасящих веществ семян. Использование гидротермального кремнезема влияет на уровень и направленность метаболизма растений, что приводит к изменению свойств растений. Можно предполагать, что механизмы воздействия нанокремнезема на растения будут различаться при выращивании на свету или

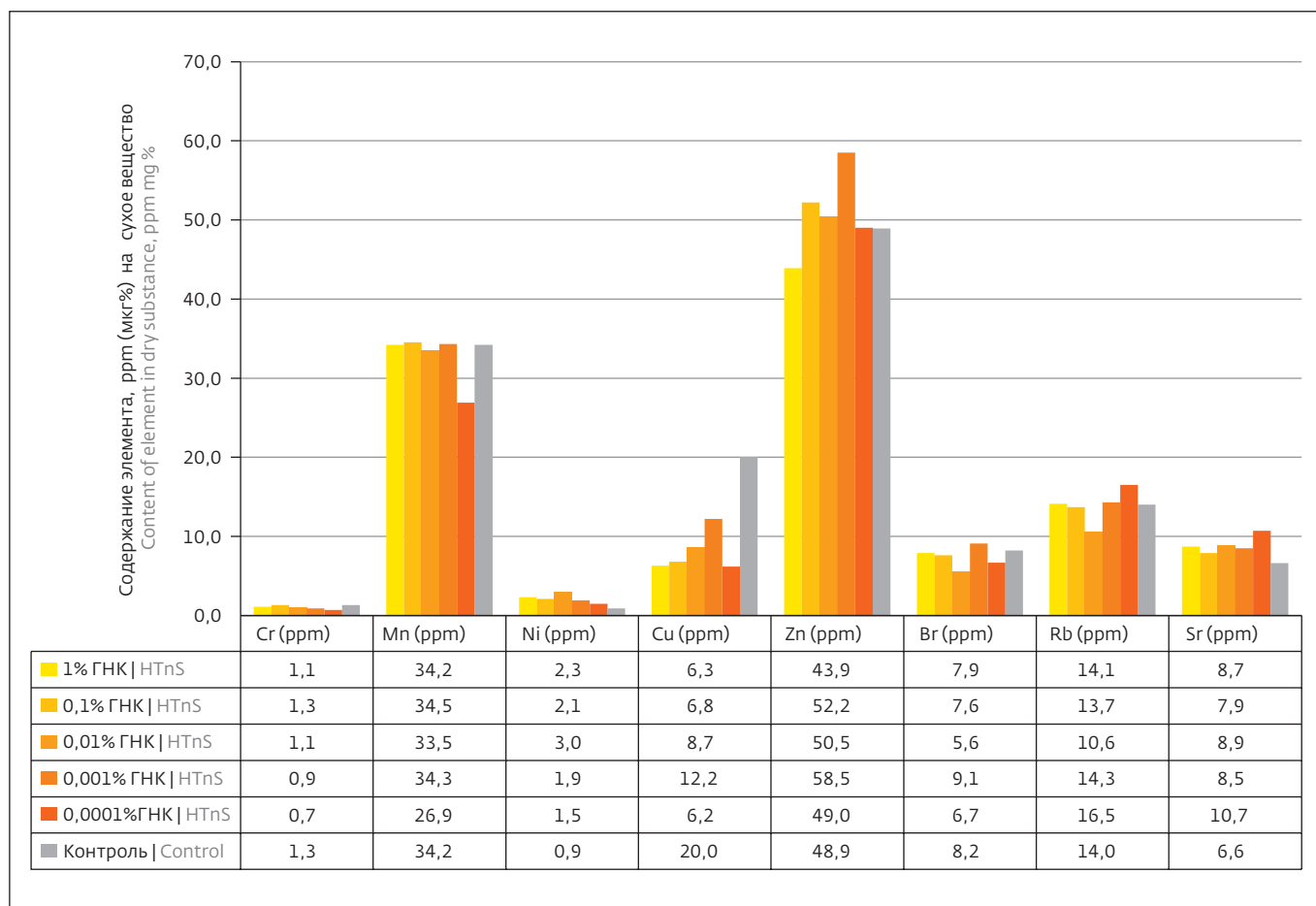


Рис.6. Содержание микроэлементов в ростках (надземной части) пшеницы при обработке ГНК разных концентраций, ppm (мкг %) на седьмые сутки проращивания

Fig.6. Content of microelements in the sprouts (above ground part) of wheat when treated with HOCs in different concentrations, ppm (µg %) on the 7th day of germination

by 11.3%, at a concentration of GNK of 0.1% by 10.6%; at a concentration of GNK 0.001% the differences with control group are statistically significant (Fig.2). Treatment with GNK at a concentration of 0.0001% practically does not affect the height of the shoots (the difference with the control group is statistically insignificant). A 1.0% concentration of HOC leads to a 14% weakening of plant growth. Thus, according to the parameter of increasing the height of sprouts when growing microgreens of winter wheat, it is necessary to use hydrothermal

nanosilica in the concentration range of 0.1-0.001%.

Measurement of the average mass of 100 shoots at the end of the germination period (on the 7th day) showed (Fig.3) that a statistically significant increase in the mass of shoots was observed in the options 0.1% and 0.01% by 11.0 and 17.6%, respectively. When processing GNC in other concentrations, the weight of 100 sprouts practically did not differ from the control. Thus, to intensify the production of wheat microgreens, treatment with HOC in concentrations of 0.1% and 0.01% is effective.

Thus, according to all studied parameters (seed germination, plant height and biomass of 100 shoots), the best option is the HOC concentration of 0.01%, the option of 0.1% concentration being somewhat inferior. Treatment with GNK at a concentration of 0.0001% practically does not affect the germination and growth of plants. At a concentration of 0.001%, the growth of winter wheat plants is activated, but to a lesser extent than at concentrations of 0.1-0.01%.

Treatment with HOC affects not only the growth parameters



в темновом режиме. Данный методический аспект в настоящее время мало разработан, но представляется существенным для получения функциональных продуктов на основе микрозелени.

Обработка гидротермальным нанокремнеземом (ГНК) в концентрациях 0,1 и 0,01% способствовала увеличению всхожести семян на 5–6%, средней высоты ростков (микрозелени) на 11,3–11,9%, биомассы растений на 11,0% (0,1%-ный раствор ГНК) и 17,6% (0,01% ГНК). Более низкие концентрации ГНК 0,001 и 0,0001% мало влияли на изменение посевных свойств семян и рост сеянцев. Однако при высоких концентрациях нанокремнезема (1%) всхожесть снижалась на 4%, а высота ростков на седьмые сутки – на 14%.

Обработка ГНК влияет не только на параметры роста озимой пшеницы, но также приводит к изменению химического состава. При оптимальной для прорастания семян и роста растений концентрации ГНК (0,01%) в надземной массе отмечается также максимальное накопление сухих веществ. Одним из важных методических аспектов применения нанокремнезема представляется учет комплекса параметров воздействия препарата. Так, при обработке ГНК 0,0001% ростовые процессы не ускорялись, однако накопление сухих веществ усиливалось, то есть концентрация, не оказавшая видимого влияния на ростовые процессы, приводила к изменению химического состава. Обработка ГНК с разными концентрациями приводит

к возрастанию содержания кремния в ростках в 1,5–2 раза по сравнению с контролем, что может быть ценным при производстве функциональных продуктов питания. Содержание фосфора, серы, магния, натрия в ростках (надземной части растений) при обработке нанокремнеземом и в контроле оставалось относительно стабильным, не зависящим от обработки семян водными золями ГНК разных концентраций. Содержание кальция возрастало в варианте использования 0,01% ГНК, калия – в варианте применения 0,0001% ГНК. Из микроэлементов в наибольших количествах в ростках накапливаются цинк и марганец. Содержание цинка и меди повышается при обработке семян пшеницы водными золями ГНК в варианте концентрации 0,001%.

Таким образом, для повышения всхожести семян и ускорения роста растений при выращивании микрозелени озимой пшеницы в темновом режиме перспективно использование гидротермального нанокремнезема в концентрации 0,01%, а также 0,1%.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Webb G.P.** Dietary Supplements and Functional Foods, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, (2006) 1–120.
2. **Drewnowski A., Gomez-Carneros C.** (2000). Bitter taste, phytonutrients, and the consumer: A review. American Journal of Clinical Nutrition, 72, pp. 1424–1435.

of winter wheat, but also leads to a change in the chemical composition. At the optimum concentration of HOC for seed germination (0.01%) in the aboveground mass, the maximum accumulation of dry substances is also observed (Fig.4). Note that in the 0.1% variant, which is also favorable for plant growth, there is no increase in the dry matter content compared to the control. At the same time, when the HOC was treated with 0.0001%, the growth processes did not accelerate, but the accumulation of dry matter increased. This

once again indicates the need to take into account not one but a set of parameters when assessing effectiveness of a particular preparation containing nanoparticles, in particular, HOC. Even such low concentration, which did not have a visible effect on growth processes, led to a change in the chemical composition.

To assess the change in the elemental composition of seeds and shoots during treatment with hydrothermal nanosilica at different concentrations, a set of studies was carried out using X-ray fluorescence analysis.

Treatment of seeds with a silicon-containing preparation (GNC) was carried out by soaking them for 2 hours in a solution of the preparation of the appropriate concentration.

Treatment with GNC at different concentrations leads to an increase in the silicon concentration in the sprouts by 1.5–2 times compared to the control (Fig.5). It is characteristic that sowing with seeds treated with 1.0% HOC does not lead to a noticeable increase in the accumulation of an element in wheat seedlings, although the almost 4-fold increase in



3. **Иванова М.И., Кашлева А.И., Михайлов В.В., Разин О.А.** Инновационная специфическая продукция: органические ростки (Microgreens) и сеянцы (Baby leaves) // Овощи России. 2016. № 1 (30). С. 29–33.
4. **Иванова М.И., Кашлева А.И., Михайлов В.В., Разин О.А.** Инновационная специфическая продукция: органические ростки (microgreens) и сеянцы (baby leaves) // Овощи России. 2016. № 1 (30). С. 29–33.
5. **Marton M., Mandoki Zs., Csapo-Kiss Zs., Csapo J.** The role of sprouts in human nutrition. A review // Acta Univ. Sapientiae, Alimentaria, 3 (2010), 81–117.
6. **Schenker S.** Facts behind the headlines, Broccoli, British Nutrition Foundation – Nutrition Bulletin, 27 (2002), 159–160.
7. **Finley J.W.** Proposed criteria for assessing the efficacy of cancer reduction by plant foods enriched in carotenoids, glucosinolates, polyphenols and selenocompounds, Annals of Botany, 95 (2005), 1075–1096.
8. **Penas E., Gomez R., Frias J., Vidal-Valverde C.** Application of high-pressure on alfalfa (*Medicago sativa*) and mung bean (*Vigna radiata*) seeds to enhance the microbiological safety of their sprouts, Food Control, 19 (2008), 698–705.
9. **Gill C.I.R., Haldar S., Porter S., Matthews S., Sullivan S., Coulter J. McGlynn H., Rowland I.** The effect of cruciferous and leguminous sprouts on genotoxicity, in vitro and in vivo, Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention, 13 (2004) 1199–1205.
10. **Haddad P.S., Azar G.A., Groom S., Boivin M.** Natural health products, modulation of immune function and prevention of chronic diseases, Evidence-Based Research in Complementary and Alternative Medicine, 2 (2005), 512–520.
11. **Murillo G., Mehta R.G.** Cruciferous vegetables and cancer prevention, Nutrition and Cancer, 41 (2001), 17–28.
12. **Sangronis E., Machado C.J.** Influence of germination on the nutritional quality of Phaseolus vulgaris and Cajanus cajan, LWT, 40 (2007), 116–120.
13. **Fernandez-Orozco R., Piskula M.K., Zielinski H., Kozłowska H., Frias J., Vidal-Valverde C.** Germination as a process to improve the antioxidant capacity of *Lupinus angustifolius* L. var. Zapaton, European Food Research and Technology, 223 (2006), 495–502.
14. **Martinez-Villaluenga C., Frias J., Gulewicz P., Gulewicz K., Vidal-Valverde C.** Food safety evaluation of broccoli and radish sprouts, Food and Chemical Toxicology, 46 (2008), 1635–1644.
15. **Naik P.K., Swain B.K., Singh N.P.** Production and utilization of hydroponics fodder // Indian J. Anim. Nutr. 2015. V. 32. No. 1. PP. 1–9.
16. **Bakshi M.P.S., Wadhwa M., Makkar Harinder P.S.** Hydroponic fodder production: A critical assessment. Broadening Horizons. 2017. No. 48.

the silicon content was noted in the seeds after 2 hours of soaking in a HOC solution of this concentration. In variants 0.01...0.0001% GOC the highest Si accumulation was achieved in the experiment. The content of phosphorus, sulfur, magnesium and sodium in sprouts (aboveground parts of plants) during treatment with nanosilica and in control group remained relatively stable, independent of the treatment of seeds with aqueous HOC sols of different concentrations (Fig.5). The calcium content increased in the case of using 0.01% GOC,

potassium – in the option of using 0.0001% GOC.

Zinc and manganese accumulated in the sprouts in maximum quantities as compared with other microelements. The content of zinc and copper increases when wheat seeds are treated with aqueous HOC sols at a concentration of 0.001% (Fig.6).

CONCLUSIONS

Relevance of the development of functional food products for humans necessitates the need for the scientists to develop new technologies for

their production. Microgreens are a promising type of product in the agricultural sector of the economy, distinguished not only by a high biological value, but also by reduction of the production costs. However, the approaches to development of modern technologies for obtaining microgreens differ significantly from traditional ones, since the harvest is carried out at the earliest stages of ontogenesis and the physiological basis for the formation of products differs from adult plants. In this aspect, the use of nanobiotechnologies is promising,



17. Weldegerima Kide Gebremedhin. Nutritional benefit and economic value of feeding hydroponically grown maize and barley fodder for Konkan Kanyal goats // *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science (IOSR-JAVS)*. Vol. 8, Issue 7, Ver. II (July 2015), PP. 24-30. <https://doi.org/10.9790/2380-08722430>.
18. **Rajkumar G., Dipu M.T., Lalu K., Shyama K. and Banakar P.S.** Evaluation of hydroponics fodder as a partial feed substitute in the ration of crossbred calves // *Indian Journal of Animal Research*. 2018. V. 52. No. 12. PP. 1809-1813.
19. **Xiao Z., Lester G.E., Luo Y., Wang Q.** Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products: edible microgreens. *J. Agric. Food Chem.* 60, 2012, pp. 7644-7651.
20. **Иванова М.И.** Салатные культуры для производства сеянцев (Baby leaf) и ростков (Microgreens) – биологически чистого овощного диетического продукта // *Экологические проблемы современного овощеводства и качество овощной продукции: сб. науч. тр., вып. 1.* – М.: ФГБНУ ВНИИО, 2014. С. 278-284.
21. **Kaiser C., Ernst M.** Microgreens. Center for Crop Diversification, University of Kentucky College of Agriculture, Food and Environment. 2018, <http://www.uky.edu/ccd/sites/www.uky.edu/ccd/files/microgreens.pdf>
22. **Kyriacou M.C., Rouphael Y., Di Gioia F., Kyratzis A., Serio F., Renna M., De Pascale S., Santamaria P.** Micro-scale vegetable production and the rise of microgreens. *Trends Food Sci. Technol.* 2016, 57, 103-115.
23. **Xiao Z.** Nutrition, sensory, quality and safety evaluation of a new specialty produce: microgreens. Doctoral dissertation. Faculty of the Graduate School of the University of Maryland 2013. http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/14900/1/Xiao_umd_0117E_14806.pdf
24. **Renna M., Di Gioia F., Leoni B., Mininni C., Santamaria P.** Culinary assessment of shelf-produced microgreens as basic ingredients in sweet and savory dishes. *J. Culin. Scien. Technol.* 2017, 15, 126-142.
25. **Pinto E., Almeida A.A., Aguiar A.A., Ferreira I.** Comparison between the mineral profile and nitrate concentration of microgreens and mature lettuces. *J Food Compos Anal* (2015) 37:38-43. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2014.06.018>.
26. **Kyriacou M.C., El-Nakhel C., Graziani G., Pannico A., Soteriou G.A., Giordano M., Ritieni A., De Pascale S., Rouphael Y.** Functional quality in novel food sources: Genotypic variation in the nutritive and phytochemical composition of thirteen microgreens species. *Food Chem.* 2019, 277, 107-118.
27. **Paradiso V.M., Castellino M., Renna M., Gattullo C.E., Calasso M., Terzano R., Allegrè I., Leoni B., Caponio F., Santamaria P.** Nutritional characterization and shelf-life of packaged microgreens. *Food Funct.* 2018, 9, 5629-5640.

in particular, the use of nano-sized forms of silicon of natural origin. In this work, new data have been obtained on assessing the effect of hydrothermal nanosilica on the sowing properties, productivity and chemical composition of winter wheat plants at the microgreening stage when germinating in a dark mode, which eliminates the cost of artificial lighting. Under such conditions, active photosynthesis and accumulation of assimilants do not occur; microgreens are formed due to metabolic changes in the storage substances of seeds. The use

of hydrothermal silica affects the level and direction of plant metabolism, which leads to a change in plant properties. It can be assumed that the mechanisms of action of nanosilica on plants will differ when grown in the light or dark mode. This methodological aspect is currently little developed, but it seems essential for the production of functional products based on microgreens.

Treatment with hydrothermal nanosilica (HNS) at concentrations of 0.1% and 0.01% promoted an increase in seed germination by 5-6%, average sprout height

(microgreens) by 11.3-11.9% and plant biomass by 11.0% (0.1% GNK solution) and 17.6% (0.01% GNK). The lower concentrations of HOC 0.001% and 0.0001% had little effect on the change in the sowing properties of seeds and the growth of seedlings. However, at high concentrations of nanosilica (1%), germination decreased by 4%, and the height of sprouts on the 7th day - by 14%.

Treatment with HOC affects not only the growth parameters of winter wheat, but also leads to a change in the chemical composition. At the optimum concentration of HOC (0.01%)

28. **Choe U., Yu L.L., Wang T.T.** The science behind microgreens as an exciting new food for the 21st century. *J. Agric. Food Chem.*, 66 (2018), pp. 11519-11530.
29. **Xiao Z., Lester G.E., Luo Y., et al.** Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products: edible microgreens. *J. Agric. Food Chem.*, 60 (2012), pp. 7644-7651.
30. **Weber C.F.** Broccoli microgreens: A mineral-rich crop that can diversify food systems. *Front. Nutr.* 2017, 4, 1-9.
31. **Bulgari R., Baldi A., Ferrante A., et al.** Yield and quality of basil, Swiss chard, and rocket microgreens grown in a hydroponic system. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.*, 45 (2017), pp. 119-129.
32. **Tan L., Nuffer H., Feng J., Kwan S.H., Chen H., Tong X., Kon L.** Antioxidant properties and sensory evaluation of microgreens from commercial and local farms. 2019, *Food Science and Human Wellness*. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.12.002>
33. **Pellegrini N., Serafini M., Colombi B., et al.** Total antioxidant capacity of plant foods, beverages and oils consumed in Italy assessed by three different in vitro assays. *J. Nutr.*, 133 (2003), pp. 2812-2819.
34. **Murphy C.J., Pill W.G.** Cultural practices to speed the growth of microgreen arugula (roquette: *Eruca vesicaria* subsp. *sativa*). *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 2010, 85, 171-176.
35. **Иванова М.И., Кашлева А.И., Михайлов В.В., Бухаров А.Ф., Балеев Д.Н., Разин О.А.** Новая категория функциональной органической овощной продукции - микрозелень, или система земледелия без почвы // *Гавриш*. 2016. № 7.
36. **Kopsell D.A., Sams C.E.** Increases in Shoot Tissue Pigments, Glucosinolates, and Mineral Elements in Sprouting Broccoli after Exposure to Short-Duration Blue Light from Light Emitting Diodes. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2013, 138, 31-37.
37. **Samuolienė G., Brazaitytė A., Sirtautas R., Viršilė A., Sakalauskaitė J., Sakalauskienė S., Duchovskis P.** 2013. LED illumination affects bioactive compounds in Romaine baby leaf lettuce. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93, 3286-91.
38. **Жизненный цикл и экология растений: регуляция и управление средой обитания в агробiotехносистемах // Сб. научн. трудов. Вып. 1. / Под ред. проф. В.Н. Зеленкова. - М.: ТЕХНОСФЕРА, АНО "Институт стратегий развития", 2018 208 с. ISBN 978-5-94836-543-5.**
39. **Зеленков В.Н., Потапов В.В.** Гидротермальный нанокремнезем в сельскохозяйственном растениеводстве и биотехнологии // *НАНОИНДУСТРИЯ*. 2020. Т. 13. № 1 (94). С. 22-33. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.1.22.33>.
40. **Потапов В.В., Сердан А.А., Кашпура В.Н., Горев Д.С.** Получение и свойства нанокремнезема на основе гидротермального раствора // *Химическая технология*. 2017. № 2. С. 65-73.

for seed germination and plant growth, the maximum accumulation of dry matter is also observed in the aboveground mass. One of the important methodological aspects of the use of nanosilica necessitates taking into account the complex of parameters of the preparation effect. Thus, when HOC was treated with 0.0001%, the growth processes did not accelerate; however, accumulation of the dry matter increased, i.e. the concentration, which had no visible effect on the growth processes, led to a change in the chemical composition.

Processing of GNC with different concentrations leads to an increase in the silicon content in the sprouts by 1.5-2 times compared to the control, which can be valuable for production of the functional food products. The content of phosphorus, sulfur, magnesium, sodium in sprouts (aboveground parts of plants) during treatment with nanosilica and in the control remained relatively stable, independent of the treatment of seeds with aqueous HOC sols of different concentrations. The calcium content increased in the case of using 0.01% GOC,

potassium - in the option of using 0.0001% GOC. Zinc and manganese accumulated in the sprouts in maximum quantities as compared with other microelements. The content of zinc and copper increases when wheat seeds are treated with aqueous HOC sols at a concentration of 0.001%.

Thus, to increase seed germination and accelerate plant growth when growing microgreens of winter wheat in the dark mode, it is promising to use hydrothermal nanosilica at a concentration of 0.01%, as well as 0.1%. ■