

Научная статья
УДК 634.75:581.14:58.01/.07:582.734.4:543.427.4
EDN: LJBWLS
DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-494-505



Модуляция роста и аккумуляции химических элементов в растениях *Fragaria × ananassa* в условиях *in vivo* под действием хелатов кремния

Е.В. Амброс*✉, Е.С. Крупович*, Ю.П. Колмогоров**, Е.Г. Трофимова***,
И.С. Гусев****, Б.Г. Гольденберг*****

*Центральный Сибирский ботанический сад СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

**Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

***Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

****Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

*****Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, пгт Кольцово, Российская Федерация

Аннотация. Значительный интерес среди биостимуляторов вызывают кремнийсодержащие препараты в связи с защитной ролью кремния в растениях от неблагоприятных факторов среды. В данной работе в качестве источника кремния использован механокомполит из шелухи риса и зеленого чая, содержащий растворимые хелатные комплексы диоксида кремния. Целью исследования являлось изучение влияния хелатов кремния на ростовые, физиологические показатели и содержание химических элементов в растениях *Fragaria × ananassa* (сорт Солнечная полянка) в условиях теплицы. Растения поливали водой без механокомполита (контроль) или водным раствором, содержащим 0,3 г/л механокомполита дважды за период. Отбор образцов проводили через неделю после последней обработки. Для определения концентрации химических элементов (Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Rb, Sr, Mo) в корнях и побегах земляники садовой предложено применение метода рентгенофлуоресцентного анализа на синхротронном излучении. Показано увеличение содержания хлорофилла *a*, суммы хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов, уменьшение содержания пероксида водорода и увеличение активности основных антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы, каталазы, пероксидазы) под действием механокомполита. Определено, что кремний накапливается под действием препарата преимущественно в побегах и оказывает влияние на аккумуляцию микро- и макроэлементов в побегах и корнях растений. Полученные результаты обосновывают использование кремнийсодержащей «зеленой химии» в качестве средств управления ростом и развитием растений земляники садовой в условиях *in vivo*.

Ключевые слова: *Fragaria × ananassa*, хелаты кремния, рост, физиологические показатели, рентгенофлуоресцентный анализ, синхротронное излучение

Благодарности. Для проведения исследований использованы материалы уникальной научной установки «Коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте» Центрального сибирского ботанического сада СО РАН (USU 440534). Измерения элементного состава методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения проводились на оборудовании Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» на базе уникальной научной установки «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области № 22-26-20061 (<https://rscf.ru/project/22-26-20061/>).

Для цитирования: Амброс Е.В., Крупович Е.С., Колмогоров Ю.П., Трофимова Е.Г., Гусев И.С., Гольденберг Б.Г. Модуляция роста и аккумуляции химических элементов в растениях *Fragaria × ananassa* в условиях *in vivo* под действием хелатов кремния // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 4. С. 494–503. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-494-505. EDN: LJBWLS.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Modulation of growth and chemical element accumulation in *Fragaria* × *ananassa* plants *in vivo* under the effect of silicon chelates

Elena V. Ambros*✉, Elena S. Krupovich*, Yurii P. Kolmogorov**,

Elena G. Trofimova***, Ivan S. Gusev****, Boris G. Goldenberg*****

*Central Siberian Botanical Garden SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

**V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

***Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

****Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

*****Synchrotron Radiation Facility – Siberian Circular Photon Source “SKIF”,

Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Koltsovo, Russian Federation

Abstract. Due to the protective role played by silicon in plants against unfavorable environmental conditions, silicon-containing preparations are of considerable interest as biostimulants. In this work, a mechanical composite of rice husk and green tea containing soluble silica chelate complexes was used as the source of silicon. The study aims to examine the effect of silicon chelates on the growth and physiological parameters and the chemical composition of *Fragaria* × *ananassa* plants (Solnechnaya Polyanka variety) under greenhouse conditions. The plants were watered using water without a mechanical composite (control) or an aqueous solution containing 0.3 g/L of mechanical composite twice per period. Sampling was carried out one week after the last treatment. In order to determine the concentration of chemical elements (Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Rb, Sr, and Mo) in the roots and shoots of garden strawberry, it was proposed to use synchrotron X-ray fluorescence analysis. The use of the mechanical composite was shown to increase the amount of chlorophyll a, chlorophylls a and b, and carotenoids; decrease the amount of hydrogen peroxide; and increase the activity of the main antioxidant enzymes (superoxide dismutase, catalase, and peroxidase). It was determined that under the effect of the preparation, silicon accumulates primarily in shoots, affecting the accumulation of micro- and macroelements in the shoots and roots of plants. The obtained results substantiate the use of silicon-containing “green chemistry” as a means of controlling the growth and development of garden strawberry plants under *in vivo* conditions.

Keywords: *Fragaria* × *ananassa*, silicon chelates, growth, physiological data, X-ray fluorescence analysis, synchrotron radiation

Acknowledgements. *In vitro* material from the collection of CSBG, SB RAS was used: unique scientific unit (USU) 440534: “Collection of living plants indoors and outdoors”. The detection of the elemental composition by the SR-XRF method was carried out on the equipment of the shared research center SSTRC on the basis of the VEPP-4 – VEPP-2000 complex at BINP SB RAS.

Funding. The Russian Science Foundation and the Government of the Novosibirsk Region funded this research, grant no. 22-26-20061 (<https://rscf.ru/project/22-26-20061/>).

For citation: Ambros E.V., Krupovich E.S., Kolmogorov Y.P., Trofimova E.G., Gusev I.S., Goldenberg B.G. Modulation of growth and chemical element accumulation in *Fragaria* × *ananassa* plants *in vivo* under the effect of silicon chelates. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(4):494-505. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-494-505. EDN: LJBWLS.

ВВЕДЕНИЕ

Земляника садовая (*Fragaria* × *ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier) является одной из самых культивируемых ягод в мире. Благодаря богатому содержанию биологически активных соединений земляника используется в рационе многих людей. При этом из-за поверхностной корневой системы, большой площади листьев и высокого содержания воды в плодах данная культура крайне чувствительна к условиям произрастания в процессе

культивирования. В связи с этим для улучшения роста и развития растений устойчивой альтернативой использования химических удобрений является применение биостимуляторов [1, 2].

Среди биостимуляторов большой интерес вызывают препараты на основе биогенного кремния (Si) [3, 4]. Считается, что такие соединения наиболее эффективно усваиваются растениями (в 2–10 раз лучше солей) [5]. Потенциально полезными для применения в качестве биостимуляторов являются

полученные из возобновляемого растительного сырья твердофазным механохимическим методом без использования органических растворителей препараты, содержащие биогенный Si в хелатной форме. В результате такой обработки растительное сырье и реагенты остаются в стабильной твердой форме, что полностью предотвращает их окисление и потерю биологической активности [6, 7]. Кроме того, наличие на территории Российской Федерации широкого спектра растительных отходов, содержащих Si, делает перспективным использование «зеленой химии» в органическом земледелии для выращивания растений.

Кремний не является эссенциальным элементом для растений, однако его присутствие в среде произрастания повышает устойчивость растений к негативным факторам различной природы [8–10]. Экзогенное применение Si улучшает рост растений и увеличивает урожайность, усиливая адаптивные реакции, связанные с активностью антиоксидантной системы растений, накоплением фенольных соединений, изменением фитогормонального статуса, скоростью фотосинтеза, поглощением минеральных элементов [11–19]. Эффекты Si связывают с модифицирующим действием на сорбционные свойства клеточных стенок, где он накапливается в форме аморфного диоксида Si, а также с образованием комплексов с различными органическими соединениями клетки и, как следствие, влиянием на метаболизм растений [20, 21]. Тем не менее, несмотря на достаточно большое количество работ по влиянию соединений Si на растения [22], необходимость Si для роста и метаболизма растений до сих пор остается предметом изучения.

Настоящее исследование сосредоточено на оценке влияния биогенного Si на рост, развитие и аккумуляцию химических элементов в растениях земляники садовой, поскольку знания о поглощении и усвоении элементов питания позволяют рационально построить систему удобрения культуры и в дальнейшем получить высокий урожай сельскохозяйственной продукции.

Для определения химического состава образцов в аналитической химии широко применяются фотометрические методы определения химических элементов [23], основанные на абсорбционной спектроскопии излучения видимого диапазона. В этих методах используют зависимость интенсивности окраски раствора от концентрации вещества в нем. В методах атомно-абсорбционной пламенной спектрометрии [24], атомно-абсорбционной электротермической спектрометрии [25], атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой [26], масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой [27] исследуемый образец переводится способами «жидкой химии» в специфический раствор для последующей атомизации в пламени, плазме и т.п. и регистрации поглощения видимого или инфракрасного излучения.

В нашей работе для определения концентраций химических элементов предложено применять энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный

анализ с использованием синхротронного излучения (РФА-СИ) [28–30]. Образцы облучаются рентгеновским излучением с энергией фотонов, достаточной для выбивания электронов с внутренних оболочек атомов и перевода атомов в возбужденное состояние. На образовавшиеся вакансии переходят электроны с внешних оболочек. Такие переходы сопровождаются высвечиванием квантов характеристического излучения с энергией, определяемой структурой атома и уникальной для каждого элемента. Исследуя энергетический спектр этого флуоресцентного излучения, можно делать выводы о качественном и количественном составе образца. Важными преимуществами метода РФА-СИ являются непрерывность полихроматического спектра синхротронного излучения и возможность выбирать из этого спектра энергию возбуждающих квантов, что дает возможность снизить пределы обнаружения для интересующих элементов. Метод является панорамным, то есть в результате одного измерения получается информация о содержании множества химических элементов. Также к преимуществам данного метода относится простота пробоподготовки: образцы необходимо высушить, измельчить и спрессовать в таблетки с одинаковой плотностью. Ко всему прочему, метод РФА-СИ относится к неразрушающим, т.е. в ходе измерения образцы не испытывают разрушающего воздействия, не изменяются, один и тот же образец может быть исследован многократно, в том числе с вариациями условий измерений (энергия возбуждения, размер и положение облучаемой области и т.п.).

Таким образом, настоящее исследование направлено на оценку содержания химических элементов в растениях земляники садовой в процессе роста, развития и адаптации к условиям *in vivo* под действием хелатов Si. В соответствии с заявленной целью поставлены следующие задачи: 1) проанализировать морфометрические параметры надземной части и корневой системы растений; 2) определить содержание основных фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов), пероксида водорода (H_2O_2), а также активность ферментов антиоксидантной системы (супероксиддисмутазы, каталазы, пероксидазы) в листьях растений; 3) провести анализ содержания химических элементов в надземной части и корневой системе растений земляники садовой под действием хелатов Si в условиях *in vivo*.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Характеристика механокомпозита, приготовление рабочего раствора для обработки. В качестве источника хелатов Si использовали препарат, полученный в результате механохимической обработки растительного сырья (механокомпозит), характеризующийся повышенной концентрацией хелатированных растворимых форм Si [7]. Основной составляющей механокомпозита являлась шелуха риса *Oryza sativa* L. сорта Лиман (Краснодарский край, Россия) с высоким содержанием биогенного Si и листья зеленого чая *Camelia sinensis* L. (Краснодарский край, Россия), содержащие хелатирующие функциональные группы,

существенно повышающие растворимость Si с 6,5 до 34,1 мг/л. Химический состав механокомпозита был следующим: экстрактивные вещества – 16,3±1,1%; гемицеллюлоза – 22,3±0,8%; лигнин – 20,2±1,5%; целлюлоза – 38,9±2,0%; катехины – 1,4±0,2%; водорастворимый мономерный Si – 34,0±0,7 мг/л. Мас-совое соотношение рисовой шелухи и зеленого чая в механокомпозите – 10:1.

Для экспериментов использовали свежий водный раствор механокомпозита, приготовленный путем перемешивания дистиллированной воды комнатной температуры и механокомпозита в концентрации 0,3 г/л и последующего настаивания в течение 1 ч при комнатной температуре. Применение данной концентрации механокомпозита обусловлено ее успешным использованием в технологии клонального микроразмножения земляники садовой на этапе адаптации регенерантов к условиям *ex vitro* [31].

Растительный материал, условия выращивания, варианты обработки механокомпозита. В качестве объекта для исследований использована рассада земляники садовой сорта Солнечная полянка, полученная с помощью технологии клонального микроразмножения. Рассада соответствовала требованиям, предъявляемым к посадочному материалу земляники крупноплодной с закрытой корневой системой. Эксперименты по оценке влияния механокомпозита на рост и развитие растений земляники садовой проводили в условиях теплицы в течение 24 дней с 20 апреля по 15 мая 2022 года (54°49'11"N и 83°6'17"E). Растения в горшках с почвенным субстратом объемом 250 мл из смеси торфа с перлитом, перегноя, песка и кокосового субстрата (1:1:0,25:0,25) поливали водой без механокомпозита или раствором с механокомпозитом дважды за период через равные промежутки времени. Под корень каждого растения вносили 90 мл раствора при достижении полной влагоемкости субстрата 50%. В промежутках растения увлажняли водой. Выращивали растения при естественном освещении 20–25 тыс. люкс, температуре воздуха 30±2 °С днем и 23±2 °С ночью, а также относительной влажности воздуха 55–60%. Опыты проводили в двукратной повторности, в каждом варианте использовано 20 растений. Отбор образцов проводили через неделю после последней обработки.

Оценка показателей вегетативной продуктивности растений. Анализировали такие показатели, как длина розетки (см), количество листьев и корней на растение (шт.), сырая и сухая масса розеток и корней (г), площадь листовой пластинки (см²). Сухую массу растительного материала определяли трехкратным высушиванием до постоянного веса при температуре 75 °С в течение 2 ч. Площадь листовых пластинок у растений рассчитывали с помощью программы SIAMS Photolab с дополнительным модулем SIAMS MesoPlant (SIAMS, Россия).

Анализ физиологических показателей. Фотосинтетические пигменты (хлорофилл *a*, *b* и каротиноиды) экстрагировали 96%-м этиловым спиртом из листьев растений, для определения оптической плотности образцов использовали спектрофотометр UNICO 2100 UV (UNICO, США). Содержание пигментов рассчитывали по формулам Х.К. Лихтеналера и К. Бушманна [32] и выражали с последующим пересчетом содержания в миллиграммах на 1 г сырого веса.

Эндогенное содержание H₂O₂ в листьях определяли спектрофотометрическим методом, основанным на окислении ионов Fe²⁺ H₂O₂ до ионов Fe³⁺, которые образуют окрашенные соединения с ксиленоловым оранжевым [33]. Концентрацию H₂O₂ устанавливали по стандартной калибровочной кривой, используя растворы H₂O₂ различной концентрации от 273 до 1500 нг/мл. Содержание H₂O₂ выражали в микромолях на 1 г сырого веса.

Активность каталазы (КФ 1.11.1.6) в листьях измеряли по скорости реакции разложения H₂O₂ в реакционной смеси согласно методике [34] и выражали в относительных единицах разложившейся H₂O₂ в минуту на 1 г сырого веса. Активность супероксидсмутазы (КФ 1.15.1.1) определяли по способности ферментного экстракта ингибировать фотохимическое восстановление нитросинего тетразолия до синего формазана [35] с небольшими модификациями [36] и выражали в относительных единицах на 1 г сырого веса. Активность пероксидазы (КФ 1.11.1.7) определяли по окислению кверцетина и выражали в относительных единицах на 1 г сырого веса в минуту [37]. Эксперименты по оценке физиологических показателей проводили в трех биологических и трех – пяти аналитических повторностях.

Исследования элементного состава. Исследования элементного состава методом РФА-СИ выполнялись в центре коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Метод РФА-СИ позволяет за одно измерение получать данные о содержании сразу многих элементов. Диапазон определяемых элементов определяется параметрами исследовательской установки, такими как энергия возбуждающего излучения и газовая среда. На экспериментальной станции РФА-СИ на синхротроне ВЭПП-3 измерения проводятся при нормальной атмосфере и энергии возбуждения 21 кэВ, размер пучка синхротронного излучения на образце – 2×5 мм. В этих условиях возможно достоверное определение элементов от К до Мо по ранее разработанным методикам [38]. Флуоресцентное излучение от элементов легче К (с энергией фотонов менее 4 кэВ) значительно поглощается атмосферным воздухом, и это не позволяет достоверно определить легкие элементы. Определение элементов с относительно малой атомной массой (Si, P, S, Cl) проводилось аналогичным способом на новой станции – «Технологической станции синхротронного излучения» – на синхротроне ВЭПП-4М [39, 40] в вакуумированной камере при давлении, пониженном до 10 Па, с энергией возбуждающих квантов 3,53 кэВ, размер пучка синхротронного излучения на образце – 1×4 мм. Для регистрации флуоресценции от более легких элементов, таких, как, например, С, N, O, F, требуется проводить измерения в высоком вакууме с энергией возбуждения менее 3 кэВ. Имеющиеся возможности экспериментальных станций РФА-СИ (ВЭПП-3) и «Технологической станции синхротронного излучения» (ВЭПП-4М) не позволяют получить такие условия. Для рентгено-флуоресцентного анализа образцы корней и побегов от 20 растений высушивали при температуре 50 °С до постоянной массы, затем перетирали и пресовали в таблетки массой 20 мг. Определение концентраций химических элементов проводили методом внешнего стандарта с использованием стандартного

образца травосмеси Тр-1 (ГСО 8922-2007; СО КООМЕТ 0066-2008-RU).

Статистический анализ. Данные представлены в виде средних значений и стандартных ошибок ($M \pm m$). Для сравнения средних значений независимых выборок использовали многограновый тест Дункана (однофакторный дисперсионный анализ). Обработку результатов проводили с помощью программного обеспечения Statistica 10.0 (Statsoft Inc., Талса, США). Двумерный кластерный анализ осуществляли с помощью программного обеспечения PAST 4.12 (Э. Хаммер, Д.А.Т. Харпер, П.Д. Райан) методом ближайшего соседа.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При тестировании новых биостимуляторов возникает необходимость не только в индикации ростовых параметров, но и в изучении особенностей физиологических процессов у растений при адаптации к факторам среды.

В нашем эксперименте обработка растений механокомпозитом существенно повлияла на развитие корневой системы растений земляники садовой (табл. 1), что согласуется с результатами других исследований, в которых показана стимуляция роста корней под действием Si у злаковых, цитрусовых, овощных культур [41]. Различия определены для длины корней и сухой массы корней. Длина корней у растений в вариантах с механокомпозитом увеличивалась относительно вариантов без механокомпозита на 30% ($P < 0,05$), сухая масса корней – на 34% ($P < 0,05$). Считается, что под действием Si изменяется архитектура клеточной стенки: она укрепляется, поскольку элемент накапливается в клетках корневого чехлика и экссудатов корневых волосков. Применение кремнийсодержащих препа-

ратов улучшает корневое питание растений, приводит к увеличению биомассы корней, их объема, общей и рабочей адсорбирующей поверхности [42].

Одним из основных показателей потенциальной продуктивности растений является содержание пигментов фотосинтеза в ассимилирующих органах. По содержанию хлорофилла можно оценить эффективность использования растениями фотосинтетически активной радиации, спрогнозировать продуктивность посадок, установить необходимость дополнительного применения удобрений и т.д. Применение механокомпозита способствовало накоплению фотосинтетических пигментов у растений закрытого грунта (см. табл. 1). Показано достоверно значимое увеличение содержания хлорофилла *a* (на 50%), суммы хлорофиллов *a* и *b* (на 40%) и изменение соотношения хлорофиллов *a/b* в сторону увеличения хлорофилла *a* в вариантах с механокомпозитом относительно контроля ($P < 0,05$). Соотношение хлорофиллов *a/b* является одной из важных характеристик для определения того, как происходит ассимиляция диоксида углерода в листьях. Увеличение этого показателя у растений свидетельствует о более эффективном использовании листьями света при обработке механокомпозитом. Формирование физиологических адаптаций под действием механокомпозита у растений в условиях теплицы подтверждается активацией антиоксидантной защитной системы. Под действием механокомпозита увеличивалось содержание каротиноидов (на 30%, $P < 0,05$). Каротиноиды предотвращают окисление хлорофилла молекулярным кислородом и регулируют степень адаптации растений к высокой интенсивности света. Содержание H_2O_2 в листьях растений под действием механокомпозита значимо уменьшалось на 24% относительно контроля ($P < 0,05$)

Таблица 1. Влияние механокомпозита на основе хелатов кремния на рост, развитие и физиологические показатели растений земляники садовой сорта Солнечная полянка

Table 1. Effect of silicon chelates based mechanocomposite on the growth, development and physiological characteristics of garden strawberry plants (cv. Solnechnaya polyanka)

Показатель	Тип обработки	
	МК-	МК+
Длина розетки, см	6,42±0,20ab	6,93±0,30a
Количество листьев, шт.	6,64±0,29a	6,80±0,20a
Площадь листовой пластинки, см ²	16,21±1,65a	17,80±1,04a
Сухая масса розетки, г	0,88±0,06a	1,00±0,05a
Длина корней, см	13,32±0,75b	17,37±0,88a
Количество корней, шт.	18,14±0,70a	17,80±0,60a
Сухая масса корней, г	0,38±0,02b	0,51±0,02a
Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/г сырого веса	0,68±0,08b	1,01±0,08a
Содержание хлорофилла <i>b</i> , мг/г сырого веса	0,40±0,05a	0,49±0,02a
Содержание хлорофиллов <i>a + b</i> , мг/г сырого веса	1,07±0,13b	1,50±0,10a
Соотношение хлорофиллов <i>a/b</i>	1,77±0,06b	2,08±0,11a
Содержание каротиноидов, мг/г сырого веса	0,23±0,03b	0,31±0,02a
Соотношение хлорофиллов <i>a + b</i> / каротиноидов	4,58±0,20a	5,01±0,35a
Содержание H_2O_2 , мкмоль/г сырого веса	3,08±0,28a	2,36±0,20b
Активность супероксидсмутазы, отн. ед/г сырого веса	38,92±4,77b	59,24±4,64a
Активность каталазы, отн. ед. H_2O_2 /мин. г сырого веса	8,59±2,11a	14,69±1,82a
Активность пероксидазы, отн. ед. кверцетина/мин. г сырого веса	0,44±0,11b	0,79±0,07a

Примечание. МК – механокомпозит на основе хелатов кремния: (МК-) – растения без обработки механокомпозитом, (МК+) – растения, которые поливались водным раствором с содержанием механокомпозита 0,3 г/л. Данные представлены в виде $M \pm m$. Средние значения в строках, за которыми следуют одинаковые буквы, не имеют значимого отличия друг от друга в соответствии с тестом Дункана. Значения достоверны при $P < 0,05$.

Таблица 2. Влияние механокомпозиата на основе хелатов кремния на содержание химических элементов в корнях и побегах растений земляники садовой сорта Солнечная полянка

Table 2. Effect of silicon chelates based mechanocomposite on the chemical elements content in the roots and shoots of garden strawberry plants (cv. Solnechnaya polyanka)

Элемент	Содержание, мкг/г			
	в корнях		в побегах	
	МК-	МК+	МК-	МК+
Si	3400,00±340,00	4800,00±480,00	3900,00±390,00	7400,00±740,00
P	2800,00±470,00	3200,00±550,00	4000,00±680,00	1600,00±270,00
S	1200,00±170,00	2000,00±300,00	850,00±120,00	900,00±120,00
Cl	7500,00±620,00	5900,00±500,00	6700,00±550,00	3300,00±270,00
K	17500,00±1200,00	18800,00±1300,00	20200,00±1400,00	21300,00±1500,00
Ca	6600,00±430,00	6000,00±400,00	13400,00±880,00	10900,00±700,00
Ti	60,00±6,70	57,00±6,40	29,00±3,20	52,00±5,80
Mn	60,00±4,00	69,00±4,50	30,00±2,00	48,00±3,00
Fe	565,00±46,00	856,00±70,00	93,00±7,60	57,00±4,70
Ni	1,50±0,20	1,60±0,20	0,30±0,04	0,20±0,02
Cu	3,60±0,30	4,50±0,40	1,90±0,17	2,30±0,20
Zn	13,70±1,10	18,20±1,50	13,50±1,10	14,60±1,20
Br	3,50±0,30	4,30±0,40	2,30±0,20	1,20±0,10
Rb	5,20±0,50	6,90±0,60	3,20±0,30	2,00±0,20
Sr	52,00±4,60	48,00±4,30	57,00±5,10	41,00±3,70
Mo	0,40±0,04	0,50±0,05	0,50±0,05	0,50±0,05

Примечание. Данные представлены в виде $M \pm m$. В исследуемых образцах определены 12 химических элементов, кроме того присутствуют Co, As, Se в концентрации ниже пределов достоверного обнаружения (менее 1 ppm).

(см. табл. 1). Известно, что сверхпродукция H_2O_2 может вызвать окислительное повреждение макромолекул и клеточных структур, что приводит к ингибированию роста и развития растений. Изменения в содержании H_2O_2 коррелировали с увеличением активностей ключевых ферментов антиоксидантной системы, которые составляют первичное звено защиты от активных форм кислорода. Активность супероксиддисмутазы в вариантах с механокомпозиатом увеличивалась на 52%, каталазы – на 71%, пероксидазы – на 80% ($P < 0,05$) по сравнению с контролем.

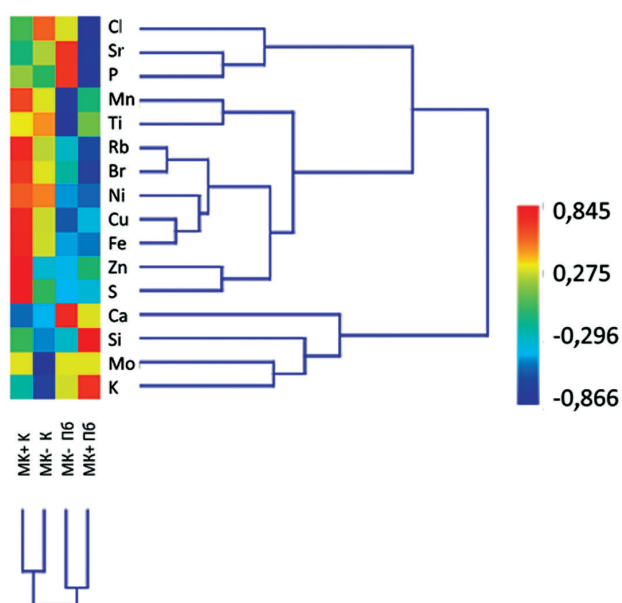
Сопоставление элементного состава растений в вариантах с обработкой механокомпозиатом и без одной выявило различия в аккумуляции Si в корнях и побегах растений земляники (табл. 2). Содержание Si в корнях образцов с обработкой механокомпозиатом увеличивалось на 41% в отличие от контрольных. Максимальное накопление Si наблюдали в побегах, его содержание было на 90% больше в вариантах с механокомпозиатом. Более того, обработка механокомпозиатом стимулировала растения к поглощению химических элементов. В большей степени механокомпозиат влиял на аккумуляцию микроэлементов. В вариантах с обработкой механокомпозиатом отмечено увеличение содержания таких микроэлементов, как: в корнях – Mn (на 15%), Fe (на 52%), Cu (на 25%), Zn (на 33%), Br (на 23%), Rb (на 33%), в побегах – Mn (на 60%), Cu (на 21%). Растения без обработки характеризовались низким содержанием микроэлементов, что, возможно, обусловлено повышенным содержанием Ca, который уменьшает подвижность и доступность микроэлементов [43].

В группе макроэлементов под действием механокомпозиата значительно увеличивались концентрации P,

S и K. В корнях растений, обработанных препаратом, по сравнению с контрольными образцами аккумуляровалось на 7% больше K, на 14% больше P и на 67% больше S. В побегах образцов с механокомпозиатом обнаружено увеличение содержания K на 5%, S на 6%. В образцах после обработки механокомпозиатом концентрации Ca уменьшались в корнях на 9%, в побегах на 19%. Уменьшение содержания Ca при применении Si объясняют снижением транспирации из-за отложения Si в клеточных стенках листьев [44], снижением поглощения Ca^{2+} из-за биоокремнения клеток корней [45] и Si-Ca взаимодействием в апопласте [46].

Для иллюстрации влияния обработки механокомпозиатом на содержание химических элементов в корнях и побегах растений земляники проведен двумерный кластерный анализ (рисунок). Данный анализ показал значительные различия элементного состава в корнях и побегах растений. В отдельные группы выделяются такие элементы, как Cl, Sr, P, большинство микроэлементов: Mn, Ti, Rb, Br, Ni, Cu, Fe, Zn и S, а также Ca, Si, Mo, K, причем Si и Ca можно выделить в отдельную группу.

Таким образом, результаты исследования показали, что земляника садовая активно поглощает Si из почвы в концентрациях, приносящих «пользу» растениям. В немногочисленных работах представлены противоречивые данные о поглощении Si растениями земляники. Известно несколько работ, в которых вид относят к растениям, аккумулирующим Si (до 3% Si на сухой вес) [47–49]. В свою очередь, М.Дж. Ходсон с соавторами [50] предположил, что земляника плохо поглощает Si. Элементный анализ показал, что под действием хелатов Si увеличивается содержание как Si, так и элементов, необходимых для фотосинтеза – P, K, S, Fe, Mn, Zn, что, возможно, опосредовано



Двумерный кластерный анализ химических элементов в корнях и побегах растений земляники садовой сорта Солнечная полянка. К – корни; Пб – побеги

Two-dimensional cluster analysis of chemical elements in the roots and shoots of strawberry plants (cv. Solnechnaya polyanka). K – roots; Пб – shoots

стимуляцией роста корней при обработке механокомпозитом и увеличением доступности этих элементов для растений. Известно, что Cu с Zn, Mn и Fe входят в состав изоформ фермента супероксидсмутазы,

который выполняет роль первичного «защитника» против активных форм кислорода, катализируя дисмутацию супероксидного анион-радикала до H_2O_2 . Аккумуляция Cu, Zn, Fe, Mn в образцах земляники под действием механокомпозита, предположительно, способствует активации процессов детоксикации с участием супероксидсмутазы и подтверждает влияние Si на работу антиоксидантной системы. Тем не менее для оценки вклада каждой изоформы в общую активность супероксидсмутазы под действием механокомпозита необходимы дальнейшие исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка растений земляники садовой механокомпозитом на основе хелатов Si в условиях закрытого грунта способствовала аккумуляции Si в побегах и корнях растений земляники садовой. Накопление Si под действием механокомпозита было сопряжено с увеличением биомассы корневой системы, изменением физиологических показателей и концентрации химических элементов у растений. Под действием хелатов Si увеличивалось содержание хлорофилла a, суммы хлорофиллов a и b, каротиноидов, уменьшалось содержание H_2O_2 , увеличивались активности основных антиоксидантных ферментов (супероксидсмутазы, каталазы, пероксидазы) и содержание макро- и микроэлементов, участвующих в окислительно-восстановительных процессах. Таким образом, полученные результаты дополняют знания о влиянии Si на растения, его аккумуляцию и обосновывают использование кремнийсодержащей «зеленой химии» в качестве средств управления ростом и развитием растений в сельском хозяйстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Durán-Lara E.F., Valderrama A., Marican A. Natural organic compounds for application in organic farming // Agriculture. 2020. Vol. 10, no. 2. P. 41. DOI: 10.3390/agriculture10020041.
2. Garza-Alonso C.A., Olivares-Sáenz E., González-Morales S., Cabrera-De la Fuente M., Juárez-Maldonado A., González-Fuentes J.A., et al. Strawberry biostimulation: from mechanisms of action to plant growth and fruit quality // Plants. 2022. Vol. 11, no. 24. P. 3463. DOI: 10.3390/plants11243463.
3. Savvas D., Ntatsi G. Biostimulant activity of silicon in horticulture // Scientia Horticulturae. 2015. Vol. 196. P. 66–81. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.010.
4. Schaller J., Cramer A., Carminati A., Mohsen Z. Biogenic amorphous silica as main driver for plant available water in soils // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. P. 2424. DOI: 10.1038/s41598-020-59437-x.
5. Битюцкий Н.П. Микроэлементы высших растений. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2011. 367 с.
6. Lomovsky O.I., Lomovskiy I.O., Orlov D.V. Mechanochemical solid acid/base reactions for obtaining biologically active preparations and extracting plant materials // Green Chemistry Letters and Reviews. 2017. Vol. 10, no. 4. P. 171–185. DOI: 10.1080/17518253.2017.1339832.
7. Trofimova E.G., Podgorbunskikh E.M., Skripkina T.S., Bychkov A.L., Lomovsky O.I. Scaling of the mechano-chemical process of production of silicon chelates from plant raw materials // Bulgarian Chemical Communications. 2018. Vol. 50. P. 45–48. EDN: QWCBSX.
8. Ma J.F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses // Soil Science and Plant Nutrition. 2004. Vol. 50, no. 1. P. 11–18. DOI: 10.1080/00380768.2004.10408447.
9. Zargar S.M., Mahajan R., Bhat J.A., Nazir M., Deshmukh R. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system // 3 Biotech. 2019. Vol. 9. P. 73. DOI: 10.1007/s13205-019-1613-z.
10. Verma K.K., Song X.-P., Tian D.-D., Guo D.-J., Chen Z.-L., Zhong C.-Z., et al. Influence of silicon on biocontrol strategies to manage biotic stress for crop protection, performance, and improvement // Plants. 2021. Vol. 10, no. 10. P. 2163. DOI: 10.3390/plants10102163.
11. Nusrat A., Réthoré E., Yvin J.-C., Hosseini S.A. The regulatory role of silicon in mitigating plant nutritional stresses // Plants. 2020. Vol. 9, no. 12. P. 1779. DOI: 10.3390/plants9121779.
12. Matichenkov V.V., Bocharnikova E.A. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties // Silicon in agriculture / eds L.E. Datnoff, G.H. Snyder, G.H. Korndörfer. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2001. P. 209–219.
13. Savvas D., Ntatsi G. Biostimulant activity of silicon in horticulture // Scientia Horticulturae. 2015. Vol. 196. P. 66–81. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.010.
14. Vatansever R., Ozyigit I.I., Filiz E. Essential and beneficial trace elements in plants, and their transport in roots: a review // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2017. Vol. 181. P. 464–482. DOI: 10.1007/s12010-016-2224-3.

15. Artyszak A. Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality – a literature review in Europe // *Plants*. 2018. Vol. 7, no. 3. P. 54. DOI: 10.3390/plants7030054.
16. Joudmand A., Hajiboland R. Silicon mitigates cold stress in barley plants via modifying the activity of apoplasmic enzymes and concentration of metabolites // *Acta Physiologiae Plantarum*. 2019. Vol. 41. P. 29. DOI: 10.1007/s11738-019-2817-x.
17. Coskun D., Deshmukh R., Sonah H., Menzies J.G., Reynolds O, Ma J.F., et al. The controversies of silicon's role in plant biology // *New Phytologist*. 2019. Vol. 221, no. 1. P. 67–85. DOI: 10.1111/nph.15343.
18. Wang L., Dong M., Zhang Q., Wu Y., Hu L., Parson J.F., et al. Silicon modulates multi-layered defense against powdery mildew in *Arabidopsis* // *Phytopathology Research*. 2020. Vol. 2. P. 7. DOI: 10.1186/s42483-020-00048-9.
19. Artyszak A., Kondracka M., Gozdowski D., Siuda A., Litwińczuk-Bis M. Impact of foliar application of various forms of silicon on the chemical composition of sugar beet plants // *Sugar Tech*. 2021. Vol. 23. P. 546–559. DOI: 10.1007/s12355-020-00918-8.
20. Колесников М.П. Формы кремния в растениях // *Успехи биологической химии*. 2001. Т. 41. С. 301–332.
21. Luycx M., Hausman J.-F., Lutts S., Guerriero G. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives // *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. P. 411. DOI: 10.3389/fpls.2017.00411.
22. Liang Y., Nikolic M., Bélanger R., Gong H., Song A. Silicon in agriculture. From theory to practice. Dordrecht: Springer, 2015. 235 p.
23. Марченко З. Фотометрическое определение элементов / пер. с польского. М.: Мир, 1971. 502 с.
24. Levent A., Alp S., Ekin S., Karagoz S. Trace heavy metal contents and mineral of *Rosa canina* L. Fruits from Van region of Eastern Anatolia, Turkey // *Reviews in Analytical Chemistry*. 2010. Vol. 29, no. 1. P. 13–24. DOI: 10.1515/REVAC.2010.29.1.13.
25. Филатова Д.Г., Еськина В.В., Барановская В.Б., Карпов Ю.А. Современные возможности электротермической атомно-абсорбционной спектрометрии высокого разрешения с непрерывным источником спектра // *Журнал аналитической химии*. 2020. Т. 75. N 5. С. 387–393. DOI: 10.31857/S0044450220050047. EDN: ZRVTRX.
26. Kazaz S., Baydar H., Erbas S. Variations in chemical compositions of *Rosa damascena* Mill. and *Rosa canina* L. fruits // *Czech Journal of Food Sciences*. 2009. Vol. 27, no. 3. P. 178–184. DOI: 10.17221/5/2009-CJFS.
27. Серегина И.Ф., Осипов К., Большов М.А., Филатова Д.Г., Ланская С.Ю. Матричные помехи при определении элементов в биологических образцах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и пути их устранения // *Журнал аналитической химии*. 2019. Т. 74. N 2. С. 136–146. DOI: 10.1134/S0044450219020117. EDN: YVTUVF.
28. Трунова В.А., Зверева В.В. Метод рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения: объекты исследования // *Журнал структурной химии*. 2016. Т. 57. N 7. С. 1401–1407. DOI: 10.15372/JSC20160705. EDN: WZVIML.
29. Храмова Е.П., Сыева С.Я., Ракшун Я.В., Сороколетов Д.С. Рентгенофлуоресцентный анализ с использованием синхротронного излучения в ботанических исследованиях: элементный состав растений из Горного Алтая (сем. Fabaceae) // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2023. Т. 87. N 5. С. 733–737. DOI: 10.31857/S0367676522701265. EDN: ABLTMT.
30. Legkodymov A.A., Kuper K.E., Kolmogorov Y.P., Baranov G.N. The SRXFA station on the VEPP-4M storage ring // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2019. Vol. 83, no. 2. P. 112–115. DOI: 10.3103/S1062873819020199.
31. Ambros E.V., Toluzakova S.Y., Shrainer L.S., Trofimova E.G., Novikova T.I. An innovative approach to *ex vitro* rooting and acclimatization of *Fragaria × ananassa* Duch. microshoots using a biogenic silica and green-tea-catechin-based mechanocomposite // *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2018. Vol. 54, no. 4. P. 436–443. DOI: 10.1007/s11627-018-9894-1.
32. Lichtenthaler H.K., Buschmann C. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-Vis spectroscopy // *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*. 2001. P. F4.3.1–F4.3.8. DOI: 10.1002/0471142913.faf0403s01.
33. Bellincampi D., Dipperro N., Salvi G., Cervone F., De Lorenzo G. Extracellular H₂O₂ induced by oligogalacturonides is not involved in the inhibition of the auxin-regulated *rolB* gene expression in tobacco leaf explants // *Plant Physiology*. 2000. Vol. 122, no. 4. P. 1379–1385. DOI: 10.1104/pp.122.4.1379.
34. Aeby H. Catalase *in vitro* // *Methods in Enzymology*. 1984. Vol. 105. P. 121–126. DOI: 10.1016/s0076-6879(84)05016-3.
35. Giannopolitis C.N., Ries S.K. Superoxide dismutase: I. Occurrence in higher plants // *Plant Physiology*. 1977. Vol. 59, no. 2. P. 309–314. DOI: 10.1104/pp.59.2.309.
36. Полесская О.Г., Каширина Е.И., Алехина Н.Д. Изменение активности антиоксидантных ферментов в листьях и корнях пшеницы в зависимости от формы и дозы азота в среде // *Физиология растений*. 2004. Т. 51. N 5. С. 686–691. EDN: OXNXLZ.
37. Жанаева Т.А., Лобанова И.Е., Кукушкина Т.А. Флавонолы и окисляющие их ферменты в онтогенезе гречихи посевной // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 1999. N 1. С. 105–108.
38. Сидорина А.В., Трунова В.А., Алексеева А.Н. Определение микроэлементного состава шиповника собачьего (*Rosa canina*) из разных мест произрастания методом РФА-СИ // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2014. Т. 22. N 2. С. 181–186. EDN: SMJYYR.
39. Гольденберг Б.Г., Ракшун Я.В., Бугаев С.В., Мешков О.И., Цыбуля С.В. Проект технологической станции синхротронного излучения на ВЭПП-4М // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2019. Т. 83. N 2. С. 176–180. DOI: 10.1134/S0367676519020157. EDN: YVTWTR.
40. Goldenberg B.G., Gusev I.S., Zubavichus Y.V. Synchrotron radiation station on the VEPP-4M for practical training // *Synchrotron and free electron laser radiation: generation and application (SFR-2022): book of abstracts*. Novosibirsk: Institute of Nuclear Physics G.I Budker SB RAS, 2022. P. 123–124. EDN: JNUCCT.
41. Самсонова Н.Е. Кремний в растительных и животных организмах // *Агрохимия*. 2019. N 1. С. 86–96. DOI: 10.1134/S0002188119010071. EDN: YVTRSP.
42. Hossain M.T., Soga K., Wakabayashi K., Kamisaka S., Fujii S., Yamamoto R., et al. Modification of chemical properties of cell walls by silicon and its role in regulation of the cell wall extensibility in oat leaves // *Journal*

of Plant Physiology. 2007. Vol. 164, no. 4. P. 385–393. DOI: 10.1016/j.jplph.2006.02.003.

43. Алексеева-Попова Н.В., Дроздова И.В. Микроэлементный состав растений полярного Урала в контрастных геохимических условиях // Экология. 2013. N 2. С. 90–98. DOI: 10.7868/S0367059713020030. EDN: PVXCMB.

44. Ma J.F., Takahashi E. Interaction between calcium and silicon in water-cultured rice plants // Plant and Soil. 1993. Vol. 148. P. 107–113. DOI: 10.1007/bf02185390.

45. Fleck A.T., Schulze S., Hinrichs M., Specht A., Waßmann F., Schreiber L., et al. Silicon promotes exodermal Casparian band formation in Si-accumulating and Si-excluding species by forming phenol complexes // PLOS One. 2015. Vol. 10, no. 9. P. e0138555. DOI: 10.1371/journal.pone.0138555.

46. Dishon M., Zohar O., Sivan U. Effect of cation size and charge on the interaction between silica surfaces in 1:1, 2:1, and 3:1 aqueous electrolytes // Langmuir. 2011. Vol. 27, no. 21. P. 12977–12984. DOI: 10.1021/la202533s.

REFERENCES

1. Durán-Lara E.F., Valderrama A., Marican A. Natural organic compounds for application in organic farming. *Agriculture*. 2020;10(2):41. DOI: 10.3390/agriculture10020041.

2. Garza-Alonso C.A., Olivares-Sáenz E., González-Morales S., Cabrera-De la Fuente M., Juárez-Maldonado A., González-Fuentes J.A., et al. Strawberry biostimulation: from mechanisms of action to plant growth and fruit quality. *Plants*. 2022;11(24):3463. DOI: 10.3390/plants11243463.

3. Savvas D., Ntatsi G. Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Scientia Horticulturae*. 2015;196:66–81. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.010.

4. Schaller J., Cramer A., Carminati A., Mohsen Z. Biogenic amorphous silica as main driver for plant available water in soils. *Scientific Reports*. 2020;10:2424. DOI: 10.1038/s41598-020-59437-x.

5. Bityutskii N.P. *Microelements of higher plants*. St. Petersburg: Saint Petersburg State University; 2011, 367 p. (In Russian).

6. Lomovsky O.I., Lomovskiy I.O., Orlov D.V. Mechanochemical solid acid/base reactions for obtaining biologically active preparations and extracting plant materials. *Green Chemistry Letters and Reviews*. 2017;10(4):171–185. DOI: 10.1080/17518253.2017.1339832.

7. Trofimova E.G., Podgorbunskikh E.M., Skripkina T.S., Bychkov A.L., Lomovsky O.I. Scaling of the mechanochemical process of production of silicon chelates from plant raw materials. *Bulgarian Chemical Communications*. 2018;50:45–48. EDN: QWCBXS.

8. Ma J.F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*. 2004;50(1):11–18. DOI: 10.1080/00380768.2004.10408447.

9. Zargar S.M., Mahajan R., Bhat J.A., Nazir M., Deshmukh R. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. *3 Biotech*. 2019;9:73. DOI: 10.1007/s13205-019-1613-z.

10. Verma K.K., Song X.-P., Tian D.-D., Guo D.-J., Chen Z.-L., Zhong C.-Z., et al. Influence of silicon on biocontrol strategies to manage biotic stress for crop protection, performance, and improvement. *Plants*. 2021;10(10):2163. DOI: 10.3390/plants10102163.

11. Nusrat A., Réthoré E., Yvin J.-C., Hosseini S.A. The regulatory role of silicon in mitigating plant nutritional stresses.

47. Miyake Y., Takahashi E. Effect of silicon on the growth and fruit production of strawberry plants in a solution culture // *Soil Science and Plant Nutrition*. 1986. Vol. 32, no. 2. P. 321–326. DOI: 10.1080/00380768.1986.10557510.

48. Ouellette S., Goyette M.-H., Labbé C., Laur J., Gaudreau L., Gosselin A., et al. Silicon transporters and effects of silicon amendments in strawberry under high tunnel and field conditions // *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. P. 949. DOI: 10.3389/fpls.2017.00949.

49. Kanto T., Miyoshi A., Ogawa T., Maekawa K., Aino M. Suppressing effect of liquid potassium silicate on powdery mildew of strawberry in soil // *Journal of General Plant Pathology*. 2006. Vol. 72. P. 137–142. DOI: 10.1007/s10327-005-0270-8.

50. Hodson M.J., White P.J., Mead A., Broadley M.R. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants // *Annals of Botany*. 2005. Vol. 96, no. 6. P. 1027–1046. DOI: 10.1093/aob/mci255.

Plants. 2020;9(12):1779. DOI: 10.3390/plants9121779.

12. Matichenkov V.V., Bocharnikova E.A. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: Datnoff L.E., Snyder G.H., Korndörfer G.H. (eds). *Silicon in agriculture*. Amsterdam: Elsevier Science B.V.; 2001, p. 209–219.

13. Savvas D., Ntatsi G. Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Scientia Horticulturae*. 2015;196:66–81. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.010.

14. Vatansever R., Ozyigit I.I., Filiz E. Essential and beneficial trace elements in plants, and their transport in roots: a review. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2017;181:464–482. DOI: 10.1007/s12010-016-2224-3.

15. Artyszak A. Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality – a literature review in Europe. *Plants*. 2018;7(3):54. DOI: 10.3390/plants7030054.

16. Joudmand A., Hajiboland R. Silicon mitigates cold stress in barley plants via modifying the activity of apoplasmic enzymes and concentration of metabolites. *Acta Physiologica Plantarum*. 2019;41:29. DOI: 10.1007/s11738-019-2817-x.

17. Coskun D., Deshmukh R., Sonah H., Menzies J.G., Reynolds O, Ma J.F., et al. The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist*. 2019;221(1):67–85. DOI: 10.1111/nph.15343.

18. Wang L., Dong M., Zhang Q., Wu Y., Hu L., Parson J.F., et al. Silicon modulates multi-layered defense against powdery mildew in Arabidopsis. *Phytopathology Research*. 2020;2:7. DOI: 10.1186/s42483-020-00048-9.

19. Artyszak A., Kondracka M., Gozdowski D., Siuda A., Litwińczuk-Bis M. Impact of foliar application of various forms of silicon on the chemical composition of sugar beet plants. *Sugar Tech*. 2021;23:546–559. DOI: 10.1007/s12355-020-00918-8.

20. Kolesnikov M.P. Forms of silicon in plants. *Uspekhi biologicheskoi khimii*. 2001;41:301–332. (In Russian).

21. Luyckx M., Hausman J.-F., Lutts S., Guerriero G. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:411. DOI: 10.3389/fpls.2017.00411.

22. Liang Y., Nikolic M., Bélanger R., Gong H., Song A. *Silicon in agriculture. From theory to practice*. Dordrecht: Springer; 2015, 235 p.

23. Marchenko Z. Photometric determination of

elements; 1971, 502 p. (Russ. ed.: *Fotometricheskoe opredelenie elementov*. Moscow: Mir; 1971, 502 p.).

24. Levent A., Alp S., Ekin S., Karagoz S. Trace heavy metal contents and mineral of *Rosa canina* L. Fruits from Van region of Eastern Anatolia, Turkey. *Reviews in Analytical Chemistry*. 2010;29(1):13-24. DOI: 10.1515/REVAC.2010.29.1.13.

25. Filatova D.G., Es'kina V.V., Baranovskaya V.B., Karpov Y.A. Present-day possibilities of high-resolution continuous-source electrothermal atomic absorption spectrometry. *Zhurnal analiticheskoi khimii*. 2020;75(5):387-393. (In Russian). DOI: 10.31857/S0044450220050047. EDN: ZRVTRX.

26. Kazaz S., Baydar H., Erbas S. Variations in chemical compositions of *Rosa damascena* Mill. and *Rosa canina* L. fruits. *Czech Journal of Food Sciences*. 2009;27(3):178-184. DOI: 10.17221/5/2009-CJFS.

27. Seregina I.F., Bol'shov M.A., Filatova D.G., Lanskaya S.Y., Osipov K. Matrix interference in the determination of elements in biological samples by inductively coupled plasma – mass spectrometry and methods for its elimination. *Zhurnal analiticheskoi khimii*. 2019;74(2):136-146. (In Russian). DOI: 10.1134/S0044450219020117. EDN: YVTUVF.

28. Trunova V.A., Zvereva V.V. X-ray fluorescent analysis using synchrotron radiation: subjects of research. *Zhurnal strukturnoi khimii*. 2016;57(7):1401-1407. (In Russian). DOI: 10.15372/JSC20160705. EDN: WZVIML.

29. Khramova E.P., Syeva S.Ya., Rakshun Ya.V., Sorokoletov D.S. Using synchrotron radiation X-ray fluorescence analysis in botanical research to study the elemental composition of Altai Mountain plants of the family Fabaceae. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2023;87(5):733-737. (In Russian). DOI: 10.31857/S0367676522701265. EDN: ABLTMT.

30. Legkodymov A.A., Kuper K.E., Kolmogorov Y.P., Baranov G.N. The SRXFA station on the VEPP-4M storage ring. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2019;83(2):112-115. DOI: 10.3103/S1062873819020199.

31. Ambros E.V., Toluzakova S.Y., Shraimer L.S., Trofimova E.G., Novikova T.I. An innovative approach to *ex vitro* rooting and acclimatization of *Fragaria* × *ananassa* Duch. microshoots using a biogenic silica and green-tea-catechin-based mechanocomposite. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2018;54(4):436-443. DOI: 10.1007/s11627-018-9894-1.

32. Lichtenthaler H.K., Buschmann C. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-Vis spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*. 2001:F4.3.1-F4.3.8. DOI: 10.1002/0471142913.faf0403s01.

33. Bellincampi D., Dipperro N., Salvi G., Cervone F., De Lorenzo G. Extracellular H₂O₂ induced by oligogalacturonides is not involved in the inhibition of the auxin-regulated *roIB* gene expression in tobacco leaf explants. *Plant Physiology*. 2000;122(4):1379-1385. DOI: 10.1104/pp.122.4.1379.

34. Aeby H. Catalase *in vitro*. *Methods in Enzymology*. 1984;105:121-126. DOI: 10.1016/s0076-6879(84)05016-3.

35. Giannopolitis C.N., Ries S.K. Superoxide dismutase: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*. 1977;59(2):309-314. DOI: 10.1104/pp.59.2.309.

36. Poleskaya O.G., Kashirina E.I., Alekhina N.D. Changes in the activity of antioxidant enzymes in wheat leaves and roots as a function of nitrogen source and supply. *Fiziologiya rastenii*. 2004;51(5):686-691. (In Russian). EDN: OXNXLZ.

37. Zhanaeva T.A., Lobanova I.E., Kukushkina T.A. Flavonols and their oxidizing enzymes in the ontogenesis of buckwheat. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya biologicheskaya*. 1999(1):105-108. (In Russian).

38. Sidorina A.V., Trunova V.A., Alekseeva A.N. Determination of the microelement composition of *Rosa canina* from different growing sites by means of XPA-SR. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*. 2014;22(2):181-186. (In Russian). EDN: SMJYYR.

39. Goldenberg B.G., Rakshun Y.V., Bugaev S.V., Meshkov O.I., Tsybulya S.V. Designing a technological station for synchrotron radiation on the VEPP-4M. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2019;83(2):176-180. (In Russian). DOI: 10.1134/S0367676519020157. EDN: YVTWTR.

40. Goldenberg B.G., Gusev I.S., Zubavichus Y.V. Synchrotron radiation station on the VEPP-4M for practical training. In: *Synchrotron and free electron laser radiation: generation and application (SFR-2022): book of abstracts*. Novosibirsk: Institute of Nuclear Physics G.I. Budker SB RAS; 2022, p. 123-124. EDN: JNUCCT.

41. Samsonova N.E. Silicon in soils, plant and animal organisms. *Agrokhimiya*. 2019;1:86-96. (In Russian). DOI: 10.1134/S0002188119010071. EDN: YVTRSP.

42. Hossain M.T., Soga K., Wakabayashi K., Kamisaka S., Fujii S., Yamamoto R., et al. Modification of chemical properties of cell walls by silicon and its role in regulation of the cell wall extensibility in oat leaves. *Journal of Plant Physiology*. 2007;164(4):385-393. DOI: 10.1016/j.jplph.2006.02.003.

43. Alexeeva-Popova N.V., Drozdova I.V. Micronutrient composition of plants in the polar Urals under contrasting geochemical conditions. *Ekologiya*. 2013;2:90-98. (In Russian). DOI: 10.7868/S0367059713020030. EDN: PVXCMB.

44. Ma J.F., Takahashi E. Interaction between calcium and silicon in water-cultured rice plants. *Plant and Soil*. 1993;148:107-113. DOI: 10.1007/bf02185390.

45. Fleck A.T., Schulze S., Hinrichs M., Specht A., Waßmann F., Schreiber L., et al. Silicon promotes exodermal Casparian band formation in Si-accumulating and Si-excluding species by forming phenol complexes. *PLOS One*. 2015;10(9):e0138555. DOI: 10.1371/journal.pone.0138555.

46. Dishon M., Zohar O., Sivan U. Effect of cation size and charge on the interaction between silica surfaces in 1:1, 2:1, and 3:1 aqueous electrolytes. *Langmuir*. 2011;27(21):12977-12984. DOI: 10.1021/la202533s.

47. Miyake Y., Takahashi E. Effect of silicon on the growth and fruit production of strawberry plants in a solution culture. *Soil Science and Plant Nutrition*. 1986;32(2):321-326. DOI: 10.1080/00380768.1986.10557510.

48. Ouellette S., Goyette M.-H., Labbé C., Laur J., Gaudreau L., Gosselin A., et al. Silicon transporters and effects of silicon amendments in strawberry under high tunnel and field conditions. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:949. DOI: 10.3389/fpls.2017.00949.

49. Kanto T., Miyoshi A., Ogawa T., Maekawa K., Aino M. Suppressing effect of liquid potassium silicate on powdery mildew of strawberry in soil. *Journal of General Plant Pathology*. 2006;72:137-142. DOI: 10.1007/s10327-005-0270-8.

50. Hodson M.J., White P.J., Mead A., Broadley M.R. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of Botany*. 2005;96(6):1027-1046. DOI: 10.1093/aob/mci255.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Амброс Елена Валерьевна,
к.б.н., старший научный сотрудник,
Центральный сибирский
ботанический сад СО РАН,
630090, г. Новосибирск, ул. Золотодолинская,
101, Российская Федерация,
✉ ambros_ev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2119-6503>

Крупович Елена Сергеевна,
инженер-исследователь,
Центральный сибирский
ботанический сад СО РАН,
630090, г. Новосибирск, ул. Золотодолинская,
101, Российская Федерация,
e.krupovich@g.nsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4064-9106>

Колмогоров Юрий Петрович,
ведущий электроник,
Институт геологии и минералогии
им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Академика
Коптюга, 3, Российская Федерация,
kolmogorov@igm.nsc.ru
<https://orcid.org/0009-0004-1763-5456>

Трофимова Елена Геннадиевна,
научный сотрудник,
Институт химии твердого тела
и механохимии СО РАН,
630128, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18,
Российская Федерация,
shapolovaelena@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6769-3724>

Гусев Иван Сергеевич,
инженер-исследователь,
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Академика
Лаврентьева, 11, Российская Федерация,
gusev.ivan-gusev@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1088-2700>

Гольденберг Борис Григорьевич,
к.т.н., старший научный сотрудник,
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Академика
Лаврентьева, 11, Российская Федерация,
Центр коллективного пользования
«Сибирский кольцевой источник фотонов»
Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,
630559, Новосибирская область, пгт Кольцово,
пр. Никольский, 1, Российская Федерация,
b.g.goldenberg@srf-skif.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9605-784X>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena V. Ambros,
Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,
Central Siberian Botanical Garden SB RAS,
101, Zolotodolinskaya St., Novosibirsk, 630090,
Russian Federation,
✉ ambros_ev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2119-6503>

Elena S. Krupovich,
Engineer-Researcher,
Central Siberian Botanical Garden SB RAS,
101, Zolotodolinskaya St., Novosibirsk, 630090,
Russian Federation,
e.krupovich@g.nsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4064-9106>

Yurii P. Kolmogorov,
Leading Electronics Engineer,
V.S. Sobolev Institute of Geology
and Mineralogy SB RAS,
3, Akademik Koptuyug Ave., Novosibirsk, 630090,
Russian Federation,
kolmogorov@igm.nsc.ru
<https://orcid.org/0009-0004-1763-5456>

Elena G. Trofimova,
Researcher,
Institute of Solid State Chemistry
and Mechanochemistry SB RAS,
18, Kutateladze St., Novosibirsk, 630128,
Russian Federation,
shapolovaelena@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6769-3724>

Ivan S. Gusev,
Engineer-Researcher,
Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,
11, Akademik Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 30090,
Russian Federation,
gusev.ivan-gusev@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1088-2700>

Boris G. Goldenberg,
Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher,
Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,
11, Akademik Lavrentiev Ave., Novosibirsk,
30090, Russian Federation,
Synchrotron Radiation Facility – Siberian Circular
Photon Source “SKIF”, Boreskov Institute
of Catalysis SB RAS,
1, Nikolsky Ave., Koltsovo, 630559,
Novosibirsk region, Russian Federation,
b.g.goldenberg@srf-skif.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9605-784X>

Вклад авторов

Е.В. Амброс – концептуализация, разработка методологии, дизайна исследования, планирование и проведение эксперимента в условиях *in vivo*, подготовка образцов, анализ результатов; написание, критический пересмотр, редактирование текста рукописи, оформление рукописи.

Е.С. Крупович – проведение измерений элементного состава образцов методом РФА-СИ на синхротроне ВЭПП-3, обработка результатов измерений.

Ю.П. Колмогоров – проподготовка для измерений элементного состава образцов, разработка методики измерения методом РФА-СИ.

Е.Г. Трофимова – разработка методики получения механокомпозиата на основе хелатов кремния и подготовка механокомопозита для эксперимента.

И.С. Гусев – разработка программного обеспечения для проведения измерений элементного состава методом РФА-СИ.

Б.Г. Гольденберг – подготовка экспериментальной аппаратуры и проведение измерений элементного состава образцов методом РФА-СИ на синхротроне ВЭПП-4М, обработка результатов измерений; редактирование текста рукописи, оформление рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 31.07.2023.
Одобрена после рецензирования 10.10.2023.
Принята к публикации 31.10.2023.

Contribution of the authors

E.V. Ambros – conceptualization, methodology, research design, planning and carrying out the *in vivo* experiment, preparation of samples, analysis of results; writing the text of the manuscript, editing the text of the manuscript, design of the manuscript.

E.S. Krupovich – measurement of the elemental composition of samples by the SR-XRF method on VEPP-3, processing of measurement results.

Yu.P. Kolmogorov – sample preparation for the measurement of the elemental composition, development of SR-XRF measurement methods.

E.G. Trofimova – obtaining a mechanocomposite based silicon chelates and preparation of mechanocomposite for experiment.

I.S. Gusev – development of software for the measurement of elemental composition by the SR-XRF method.

B.G. Goldenberg – preparation of experimental equipment and measurement of the elemental composition of samples by the SR-XRF method on VEPP-4M, processing of measurement results; editing the text of the manuscript, the design of the manuscript.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 31.07.2023.
Approved after reviewing 10.10.2023.
Accepted for publication 31.10.2023.