

УДК 631.811.98:631.811.93

БИОСТИМУЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ¹

© 2023 г. А. О. Гранкина

*Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пущино, Московская обл., Серпуховской р-н, ул. Институтская, 2, Россия**E-mail: 9265260049@bk.ru*

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

Биостимуляторы являются новым типом агрохимикатов, обладающих высокой эффективностью при внесении низких доз (до 10 кг/га). Интерес к использованию биостимуляторов подтвержден появлением не только научных работ, но и формированием в различных странах законодательных баз, регулирующих использование и классификацию данного типа веществ в сельском хозяйстве. Благодаря воздействию кремнийсодержащих соединений как биостимуляторов роста растений можно комплексно решить несколько задач современного сельского хозяйства: минимизировать последствия воздействия стресс-факторов, снизить нормы использования ядохимикатов и доз удобрений, улучшить качество производимой продукции, остановить деградацию почв. Ассортимент мировых производителей кремниевых препаратов-биостимуляторов представлен жидкими (монокремниевой кислотой) или твердыми (аморфным кремнеземом или гелем кремниевой кислоты) формами. Существуют несколько кремний-опосредованных механизмов, обеспечивающих защиту растений в условиях биотического и абиотического стрессов. Существует гипотеза влияния кремния на сигнальную систему растений, которая требует дополнительного исследования.

Ключевые слова: биостимуляторы, кремний.**DOI:** 10.31857/S0002188123120062, **EDN:** IKYRMM**ВВЕДЕНИЕ**

Чрезмерное использование химических удобрений часто является основной причиной деградации почв, загрязнения окружающей среды и негативного влияния на здоровье человека [1]. Применение большого количества химических удобрений также связывают с дисбалансом питания выращиваемых растений, что способствует заражению болезнями сельскохозяйственных культур, усилению атак насекомых-вредителей, а также стимулирует рост сорняков [2]. Для решения этих проблем в последнее время было предложено использовать биостимуляторы, которые способствуют смягчению негативного воздействия различных абиотических стресс-факторов для выращиваемых растений, включая такие как климатические изменения (засуха, заморозки, снижение качества поливных вод и др.), где невозможно использовать традиционные химические средства защиты растений [3]; повышают природную устойчивость выращиваемых расте-

ний к биотическим стресс-факторам и снижают нормы использования ядохимикатов в сельском хозяйстве [4]; позволяют сокращать дозы применения химических удобрений и повышают эффективность использования внесенных в систему почва–растение питательных веществ [2]; улучшают качество получаемой сельскохозяйственной продукции [5]; позволяют снизить скорость деградации почвенного покрова, выраженное в уменьшении содержания важнейших микроэлементов (железа, цинка, бора и др.) [6].

Особое внимание сейчас уделяется необходимости снижения доз внесения минеральных удобрений. Например, European Commission еще до энергетического кризиса планировала снизить внесение агрохимикатов на 30% к 2050 г. [7]. Несомненно, что проблема с высокими ценами на энергоносители и природный газ еще больше повысят интерес к биостимуляторам [8]. Поэтому сегодня наиболее развивающимся сектором в сельском хозяйстве является производство и применение биостимуляторов [9, 10]. Этот рынок является одним из самых быстрорастущих секторов сельского хозяйства, увеличиваясь на 12–15% в

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 117030110139-9 и 121040800103-6 и договора АПТ-ЦИ-2020-04 с АО «Апатит».

год. Предполагают, что рынок биостимуляторов увеличится с 2.79 млрд \$ США в 2018 г. до 6.98 млрд \$ США в 2026 г.

Однако часто термин биостимулятор используют неправильно, причисляя к этому классу стимуляторы роста или микроэлементы [11]. Поэтому важно точно определить, что понимают под термином биостимулятор.

БИОСТИМУЛЯТОРЫ

Важно, что само понятие стресса у растений используют только со 2-й половины XX века [12]. Различная интенсивность и длительность негативного раздражителя порождают стресс, который вызывает специфическую или неспецифическую реакцию организма [13, 14]. Первое обычно возникает, когда стрессор фокусируется на определенной цели, второе — когда реакции на различные стрессоры схожи. Поскольку укореняющиеся растения не могут вырваться из вредной среды, они развили другие защитные стратегии, включая способность избегать стресса (например, морфологические и биохимические барьеры, препятствующие или задерживающие стрессорную активность внутри клетки, адаптацию жизненного цикла к сезонам года) и/или стрессоустойчивость (например, альтернативные пути, позволяющие клетке функционировать в стрессовых условиях, предотвращение вызванных стрессом изменений, толерантность к изменениям или механизмы быстрого восстановления повреждений) [14].

Традиционные методы производства растениеводческой продукции основаны в основном на совершенствовании агротехники (например, обработки почвы, рекультивации, внесении макро- и микроэлементов (удобрений), орошении и т.п.) ограничены из-за невозможности эффективно использовать биологический потенциал культивируемого сорта [15]. Предотвращения ущерба, наносимого вредными организмами или абиотическими стрессами полевым культурам, производство и защита растений в основном основываются на стимулировании их роста и развития с одновременным снижением опасностей, представляемых для человека и окружающей среды, а также на обеспечении безопасной высококачественной сельскохозяйственной продукцией. Использование пестицидов, представляющих собой в основном яды, позволяет снизить негативное воздействие биотических стресс-факторов, но не может влиять на абиотические стресс-факторы. Поэтому применение биостимуляторов представляется наилучшим сред-

ством удовлетворения острой потребности в альтернативных методах, основанных на новых биологически активных, экологически чистых и безопасных веществах, применение которых повышает природную устойчивость растений к неблагоприятным условиям.

Однако до сих пор нет четкого определения, что есть биостимулятор. Вот несколько примеров таких определений:

— растительные биостимуляторы (фитостимуляторы) — это различные нетоксичные вещества преимущественно природного происхождения, которые улучшают и стимулируют жизненные процессы растений более дифференцированно, чем удобрения или фитогормоны. Влияние биостимуляторов на обработанные растения не является следствием прямой способности регулировать обмен веществ, и их действие может быть разнонаправленным. Решающим моментом является то, что биостимуляторы, в отличие от биорегуляторов и гормонов, улучшают обменные процессы растений, не изменяя их естественного гомеостаза [10];

— биостимуляторы — это различные природные вещества, активирующие естественные биологические процессы, которые помогают растениям преодолеть стрессы и достичь максимального генетического потенциала с точки зрения урожайности и качества (<http://biotech2030.ru/biostimulyatory-dlya-rastenij-prodazhinabirayut-oborot/>);

— биостимулятором являются вещества и/или микроорганизмы, используемые для обработки семян, растений или ризосферных микроорганизмов, которые стимулируют естественные процессы, повышающие усвоение питательных веществ, эффективность их использования, устойчивость к абиотическому стресс-фактору или качество и урожайность сельскохозяйственных культур (Agriculture Improvement Act of 2018, USA).

Биостимуляторы используют как для обработки почвы (микроорганизмы), обработки семян, так и взрослых растений. Существует несколько классификаций биостимуляторов. Например на сайте (<https://info.agricen.com/growing-for-future-ag-biologicals-booklet>) биостимуляторы делят на 4 группы — органические кислоты, микроорганизмы, экстракты и др. Однако сегодня существует более детальные классификации биостимуляторов. Согласно регламенту Европейского Союза ((ЕС) 2019/1009), биостимуляторы в целом разделены на 2 большие категории в зависимости от происхождения — микробные и немикробные

препараты [16]. К категории микробных биостимуляторов относят бактерии, дрожжи и нитевидные грибы [17]. Эти микроорганизмы извлекают из почвы, растений и других органических материалов [18]. Микробные биостимуляторы вносят в почву, ими обрабатывают семена, и они могут оказывать прямое или косвенное действие на повышение урожайности сельскохозяйственных культур [19]. Микроорганизмы могут оказывать прямое воздействие на урожай через установление взаимной симбиотической ассоциации с растениями (например, микориза) или косвенно, увеличивая биодоступность питательных веществ для растений [20]. В последнем европейском Регламенте по удобрениям (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1009>), микроорганизмы *Azotobacter* spp., *Mycorrhiza*, *Rhizobium* spp. и *Azospirillum* spp. признаны биостимуляторами.

Для немикробных биостимуляторов обычно выделяют 6 подкатегорий: 1 — хитозан — полисахарид является компонентом хитина. Известно 2 способа получения хитозана, которые заключаются в извлечении хитозана непосредственно из клеточных стенок термохимическими или ферментативными методами деацетилирования хитина, позволяющими удалять N-ацетильные группы из хитина. В настоящее время хитозан получают путем термохимического гидролиза хитина [21]; 2 — гуминовые и фульвокислоты — природные компоненты органического вещества почвы, образующиеся в результате процессов разложения растений, животных и микроорганизмов, а также дополнительно модифицированные метаболической активностью почвенных микробов [22]; 3 — гидролизаты животных и растительных белков, которые представляют собой смесь соединений, таких как аминокислоты, пептиды и полипептиды, получаемые путем химического, ферментативного и термического гидролиза белков из сложных биологических матриц [23]; 4 — экстракты морских водорослей, которые представляют собой большую группу и включают макроскопические морские водоросли и многоклеточные водоросли, принадлежащие к различным таксономическим группам, таким как бурые, красные и зеленые водоросли [24]; 5 — фосфит [H_2PO_3^- или HPO_3^{2-}], аналог фосфата является неорганическим биостимулятором в сельском хозяйстве, который усиливает рост и продуктивность различных культурных растений, выращиваемых в условиях абиотических стресс-факторов [25], 6 — кремний является общепризнанным неорганическим биостимулятором, который актив-

но используют во многих странах как биостимулятор [26].

Часто к неорганическим биостимуляторам относят также селен, поскольку препараты на его основе позволяли улучшить усвоение питательных веществ, повышать устойчивость растений к стресс-факторам и улучшать качество урожая [27].

Эффективное использование биостимуляторов требует понимания процессов, определяющих их воздействия на онтогенез и устойчивость выращиваемых растений. Любой стресс-фактор усиливает синтез активных форм кислорода (АФК), что характерно для большинства живых организмов, вызывая окислительный стресс [28, 29]. АФК — супероксидный радикал, пероксид водорода, синглетный кислород, гидроксильный радикал, пероксидный и алкоксильные радикалы [30]. В клетках любого организма происходят окислительно-восстановительные реакции, которые обеспечивают эти организмы необходимой энергией. Молекулярный кислород важен для извлечения химической энергии, запасенной в органических молекулах и прежде всего углеводах и белках. С его помощью различные ферменты (оксидоредуктазы) осуществляют окислительные реакции. Противовесом АФК в этих реакциях являются различные антиоксиданты [31]. Антиокислительная защитная система включает ферментативные (энзимные) и неферментативные (не энзимные) компоненты [32]. Ферментативные компоненты (аскорбатпероксидаза, глутатионпероксидаза, глутатионредуктаза, гваяколпероксидаза, каталаза, супероксиддисмутаза и др.) работают в разных клеточных компартментах и активируются, когда клетки испытывают окислительный стресс, т.е. находятся под каким-либо стресс-фактором. Аскорбиновая кислота, α -токоферол, глутатион, каротиноиды, пролин и флавоноиды относятся к неферментативным антиоксидантам [33]. Механизм снижения активности АФК антиоксидантами может быть различным, но все они либо нейтрализуют избыточный заряд АФК, либо расщепляют АФК и липидные радикалы, либо защищают напрямую клеточные мембраны и клеточные органеллы [31, 33, 34].

Несмотря на то, что сами АФК, как правило, обладают сигнальными функциями, инициируя процессы активации энзимных и неэнзимных антиоксидантов, противостоять многим стресс-факторам растения не могут, что ведет к потерям урожая и качества выращиваемой продукции. Поэтому поддержание баланса окислительно-восстановительных процессов при использовании биостимуляторов является основным спосо-

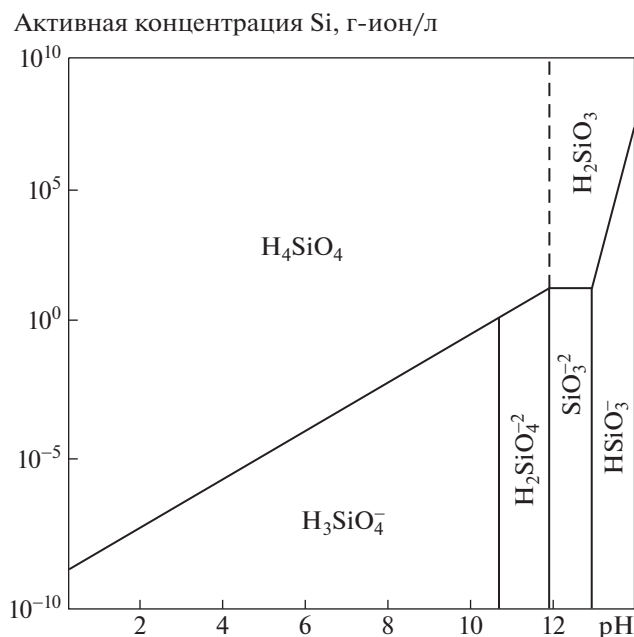


Рис. 1. Типы кремниевых кислот в растворах [42].

бом защиты растений в условиях стресс-факторов. Способность того или иного продукта, участвующего непосредственно в регулировании окислительно-восстановительного баланса растений, является одним из ключевых параметров классификации этого продукта как биостимулятора.

КРЕМНИЕВЫЕ БИОСТИМУЛЯТОРЫ

Многочисленные современные исследования свидетельствуют, что кремневые препараты положительно влияют на онтогенез растений и их устойчивость к стрессам различной природы [35, 36]. В настоящее время определены следующие механизмы, обеспечивающие защиту растений при использовании кремний-содержащих соединений в условиях биотического и абиотического стресс-факторов: 1 — аккумуляции кремния в эпидермальных тканях растений и образование двойного кутикулярного слоя, который препятствует развитию заболеваний растений и атакам насекомых [37]; 2 — ускорение развития корневой системы растений и увеличение содержания хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов в клетках растений [38]; 3 — нейтрализация неорганических загрязняющих веществ (тяжелых металлов и мышьяка) монокремниевой кислотой в апопласте и симпласте растений [39]; 4 — контроль и регуляция транспорта макро- и микроэлементов [40]; 5 — активация специфических и неспецифических антиоксидантов при воздействии на растения различных стресс-факторов [41].

В настоящее время можно выделить 2 группы кремнийсодержащих препаратов, которые могут быть определены как биостимуляторы согласно малым дозам внесения (до 10 кг/га) и по воздействию на растения, где фиксируется увеличение активности стресс-ферментов или антиоксидантов. Это жидкие препараты на основе концентрированной монокремниевой кислоты и твердые препараты, химический состав которых определяется либо как аморфный тонкодисперсный кремнезем, либо как гель кремниевой кислоты.

Препараты на основе концентрированной монокремниевой кислоты. Препараты этой группы производят во многих странах — США (Quick-sol, Silica Boost, EcoSil), Польше (Optysil), Индии (Liquid Silicon, SiSili, Lquisil), России (Ревитаплант кремний, Ek-Si). Обычно концентрация растворенного кремния в этих препаратах составляет от 5 до 15% Si, и препаративной формой этих препаратов является монокремниевая кислота.

Монокремниевая кислота содержит 1 атом кремния. Часто встречающаяся форма монокремниевой кислоты — ортокремниевая кислота (H_4SiO_4), $pK = -9.85$ и ее анион — $H_3SiO_4^-$. Мета-кремниевая кислота (H_2SiO_3) встречается в природе редко [42] (рис. 1).

В ряде экспериментов было показано, что монокремниевая кислота стабильна при pH 7.0 при концентрации до 100 мг Si/л [43, 44]. При дальнейшем увеличении концентрации монокремниевой кислоты в нейтральном растворе происходит процесс полимеризации кремниевой кислоты. Для растворов с низким pH процесс полимеризации кремниевой кислоты происходит при более низких концентрациях монокремниевой кислоты, а для растворов с высоким pH полимеризация может вообще не происходить [44]. Скорость процесса полимеризации зависит от нескольких факторов, включая исходную концентрацию мономеров кремниевой кислоты. Поэтому для жидких препаратов можно стабилизировать высокую концентрацию монокремниевой кислоты. В основном для этого используют щелочь (например, Quick-Sol, Eco-Sil, Эк-Си). Однако в препарате Optusil используют азотные соединения для стабилизации концентрированного раствора монокремниевой кислоты.

Эффекту жидких кремнийсодержащих препаратов посвящено много работ [45–50]. Эти препараты обычно вносят в виде некорневой (листовой) подкормки выращиваемых растений. В исследованиях охвачено большое количество культур: картофель, сахарная свекла, люпин, пшеница, лук, рис, рапс и др.

В литературе описаны различные эффекты жидких кремнийсодержащих биостимуляторов, прежде всего на урожайность и качество выращиваемой продукции. Многие работы посвящены специальным эффектам, таким как снижение токсичности тяжелых металлов [51, 52], устойчивость к абиотическим и биотическим стрессам [41, 53].

Нами в предыдущих исследованиях было сделано предположение, что защита растений при внесении Si-содержащих соединений может быть определена: 1 — влиянием на передачу внутри- и внеклеточных сигналов, что может приводить к ответным реакциям клетки или всего организма на внешнее воздействие, либо 2 — оказывать прямое влияние на синтез соединений, участвующих в снижении активности АФК.

Препараты на основе твердых кремнийсодержащих соединений. Твердых кремнийсодержащих биостимуляторов, которые бы использовали на практике или в научных исследованиях значительно меньше. В 2023 г. был зарегистрирован как биостимулятор препарат АпаСил (ФосАгро), который является твердым и представляет собой твердый материал с содержанием 31.5% SiO₂. Он рекомендован для обработки семян и некорневой (листовой) подкормки растений. Наши исследования показали, что применение этого препарата повышало устойчивость пшеницы и сахарной свеклы к низким температурам [41]. Было показано, что кроме влияния на ростовые параметры, внесение твердого кремний-содержащего биостимулятора повышало содержание фотосинтетических пигментов и повышало активность таких антиоксидантов как аскорбат пероксидаза, гуаколпероксидаза. Также было отмечено уменьшение количества продуктов, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой [41].

Тонкодисперсный аморфный диоксид кремния или микросилика применяют в некоторых исследованиях с использованием низких доз, что позволило использовать эти препараты как биостимуляторы [52, 54].

В последнее время появились работы, где применяют кремниевые препараты, имеющие наноразмеры частиц [55, 56]. В этих работах показано, что нанокремний положительно влиял на растения при обработке семян [57, 58] и при обработке листьев растений [59]. При этом также отмечено увеличение активности стресс-ферментов, что позволило культивируемым растениям снизить негативный эффект от действия стресс-факторов [60]. Часто нанокремний используют совместно с

другими неорганическими веществами, что усиливает положительный эффект [61, 62].

Однако при использовании твердых форм кремнийсодержащих биостимуляторов сложно определить сам механизм воздействия. Обычно эти препараты перед применением смешивают с водой или водным раствором. Так как скорость растворения кремнезема очень высокая [43], то можно предположить, что действующим веществом является образовавшаяся монокремниевая кислота. С другой стороны, вода быстро испаряется, и кремнийсодержащие частицы, особенно наноразмеров могут оказывать прямое влияние на сигнальную систему растений. Но это предположение необходимо доказать.

Однако подтверждение участия активных форм кремния в работе сигнальной системы растений трудно доказать при использовании существующих методов исследования, но некоторые работы указывают на такую возможность [63].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературы свидетельствует, что кремнийсодержащие препараты как в жидкой, так и твердой форме, использованные в низких дозах (до 10 кг/га), могут оказывать положительное воздействие на выращиваемые культуры и быть классифицированы как эффективные биостимуляторы.

Использование кремнийсодержащих биостимуляторов имеет высокую эффективность, и их применение позволяет снизить негативное влияние многих стресс-факторов, включая климатические, атаки насекомых-вредителей, болезней, повысить эффективность традиционных агрохимикатов, что позволит снизить дозы их применения и повысить уровень плодородия почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Farswan K.* Effects of chemical fertilizer pesticides on human health // *Asia. J. Res. Social Sci. Human.* 2021. V. 11. № 12. P. 77–80.
2. *Sharma N., Singhvi R.* Effects of chemical fertilizers and pesticides on human health and environment: A review // *Inter. J. Agric. Environ. Biotechnol.* 2017. № 1. P. 675–679.
3. *Malik A., Mor V.S., Tokas J., Punia H., Malik S., Malik K., Karwasra A.* Biostimulant-treated seedlings under sustainable agriculture: A global perspective facing climate change // *Agronomy.* 2020. V. 11. № 1. P. 14.
4. *Shukla P.S., Mantin E.G., Adil M., Bajpai S., Critchley A.T., Prithiviraj B.* Ascophyllum nodosum-based biostimulants: Sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and

- disease management // Front. Plant Sci. 2019 № 10. P. 655.
5. Fusco G.M., Nicastro R., Rouphael Y., Carillo P. The Effects of the microbial biostimulants approved by EU Regulation 2019/1009 on yield and quality of vegetable crops // Foods. 2022 V. 11. № 17. P. 2656.
6. Mannino G., Campobenedetto C., Vigliante I., Contartese V., Gentile C., Bertea C.M. The application of a plant biostimulant based on seaweed and yeast extract improved tomato fruit development and quality // Biomolecules. 2020. V. 10. № 12. P. 1662.
7. Hansen J. EU must get serious about promoting the circular economy // The Parliament Magazine. 2018. [Электр. ресурс]. Режим доступа: https://www.theparliamentmagazine.eu/articles/partner_article/fertilizers-europe/eu-must-get-serious-aboutpromoting-circular-economy (21.10.2021)
8. Mashamaite C.V., Ngcobo B.L., Manyevere A., Bertling I., Fawole O.A. Assessing the usefulness of *Moringa oleifera* leaf extract as a biostimulant to supplement synthetic fertilizers: A Review // Plants. 2022. V 11. № 17. P. 2214.
9. Ginter A., Zarzecka K., Gugala M. Effect of herbicide and biostimulants on production and economic results of edible potato // Agronomy. 2022. V. 12. № 6. P. 1409.
10. Posmyk M.M., Szafranśka K. Biostimulators: a new trend towards solving an old problem // Front. Plant Sci. 2016. № 7. P. 748.
11. Abdel Megeed T.M., Gharib H.S., Hafez E.M., El-Sayed A. Effect of some plant growth regulators and biostimulants on the productivity of Sakha108 rice plant (*Oryza sativa* L.) under different water stress conditions // Appl. Ecol. Environ. 2021. № 19. P. 2859–2878.
12. Пятагин С.С. Стресс у растений: физиологический подход // Журн. общ. биол. 2008. Т. 69. № 4. С. 294–298.
13. Веселовский В.А., Веселова Т.В., Чернавски Д.С. Стресс растения. Биофизический подход // Физиология растений. 1993. Т. 40. № 4. С. 553–557.
14. Пахомова В.М. Основные положения современной теории стресса и неспецифический адаптационный синдром у растений // Цитология. 1995. Т. 37. № 1–2. С. 66–91.
15. Торики В.Е. Производство продукции растениеводства: учебное пособие / В.Е. Торики, О.В. Мельникова. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2017. 512 с.
16. Kour D., Rana K.L., Yadav N., Yadav A.N., Singh J., Rastegari A.A., Saxena A.K. Agriculturally and industrially important fungi: Current developments and potential biotechnological applications // Recent Advancement in White Biotechnology through Fungi. Cham, Switzerland: Springer Inter. Publish., 2019. V. 2. P. 1–64.
17. Li J., Van Gerrewey T., Geelen D. A meta-analysis of biostimulant yield effectiveness in field trials // Front. Plant Sci. 2022. № 13. P. 45.
18. Franzoni G., Cocetta G., Prinsi B., Ferrante A., Espen L. Biostimulants on crops: Their impact under abiotic stress conditions // Horticulturae. 2022. V. 8. № 3. P. 189.
19. Castiglione A.M., Mannino G., Contartese V., Bertea C.M., Ertani A. Microbial biostimulants as response to modern agriculture needs: Composition, role and application of these innovative products // Plants. 2021. № 10. P. 1533.
20. Colla G., Rouphael Y., Di Mattia E., El-Nakhel C., Cardarelli M. Co-Inoculation of glomus intraradices and trichoderma atroviride acts as a biostimulant to promote growth, yield and nutrient uptake of vegetable crops // J. Sci. Food Agric. 2015. № 95. P. 1706–1715.
21. Shahrajabian M.H., Chaski C., Polyzos N., Tzortzakis N., Petropoulos S.A. Sustainable agriculture systems in vegetable production using chitin and chitosan as plant biostimulants // Biomolecules. 2021. V. 11. № 6. P. 819.
22. Canellas L.P., Olivares F.L., Aguiar N.O., Jones D.L., Nebbioso A., Mazzei P., Piccolo A. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture // Sci. Hortic. 2015. № 196. P. 15–27.
23. Colla G., Nardi S., Cardarelli M., Ertani A., Lucini L., Canaguier R., Rouphael Y. Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture // Sci. Hortic. 2015. № 196. P. 28–38.
24. Khan W., Rayirath U.P., Subramanian S., Jithesh M.N., Rayorath P., Hodges D.M., Critchley A.T., Craigie J.S., Norrie J., Prithiviraj B. Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development // J. Plant Growth Regul. 2009. № 28. P. 386–399.
25. Gómez-Merino F.C., Gómez-Trejo L.F., Ruvalcaba-Ramírez R., Trejo-Téllez L.I. Application of phosphite as a biostimulant in agriculture. // New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering. Elsevier, 2022. P. 135–153.
26. Zellner W., Datnoff L. Silicon as a biostimulant in agriculture // Biostimulants for sustainable crop production. Burleigh Dodds Sci. Publish., 2020. P. 149–196.
27. Medrano-Macías J., Narvaéz-Ortiz W. A. Selenium and nano-selenium as a new frontier of plant biostimulant // Selenium and nano-selenium in environmental stress management and crop quality improvement. Cham: Springer, 2022. P. 41–54.
28. Гильдилов Д.И. Окислительный стресс у животных: взгляд патофизиолога // Рос. ветеринар. журн. 2020. № 4. С. 10–18.
29. Фурман Ю.В., Артюшкова Е.Б., Аниканов А.В. Окислительный стресс и антиоксиданты // Актуал. пробл. социал.-гуманит. и научн.-техн. знания. 2019. Т. 1. С. 1–3.
30. Sies H., Belousov V.V., Chandel N.S., Davies M.J., Jones D.P., Mann G.E., Winterbourn C. Defining roles of specific reactive oxygen species (ROS) in cell biology and physiology // Nat.Rev. Mol. Cell Biol. 2022. P. 1–17.
31. Ahmad P., Jaleel C.A., Salem M.A., Nabi G., Sharma S. Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress // Critic. Rev. Biotechnol. 2010. V. 30. № 3. P. 161–175.
32. Karuppanapandian T., Moon J.C., Kim C., Manoharan K., Kim W. Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms // Austral. J. Crop Sci. 2011. V. 5. P. 709–725.
33. Sharma P., Jha A.B., Dubey R.S., Pessarakli M. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidant

- tive defense mechanism in plants under stressful conditions // *J. Bot.* 2012. V. 9. P. 26.
34. Meitha K., Pramesti Y., Suhandono S. Reactive oxygen species and antioxidants in postharvest vegetables and fruits // *Inter. J. Food Sci.* 2020. P. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/8817778>
 35. Kim Y.H., Khan A.L., Waqas M., Lee I.J. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review // *Front. Plant Sci.* 2017. № 8. P. 510.
 36. 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. V. 9. № 3. P. 73.
 37. Vivancos J., Labbé C., Menzies J.G., Bélanger R.R. Silicon-mediated resistance of *Arabidopsis* against powdery mildew involves mechanisms other than the salicylic acid (SA)-dependent defense pathway // *Mol. Plant Pathol.* 2015. V. 16. № 6. P. 572–582.
 38. Frazão J.J., de Mello Prado R., de Souza Júnior J.P., Rossatto D.R. Silicon changes C : N : P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 1–10.
 39. Ji X., Liu S., Huang, J., Bocharnikova E., Matichenkov V. Monosilicic acid potential in phytoremediation of the contaminated areas // *Chemosphere.* 2016. V. 157. P. 132–136.
 40. Souri Z., Khanna K., Karimi N., Ahmad P. Silicon and plants: current knowledge and future prospects // *J. Plant Growth Regul.* 2021. V. 40. № 3. P. 906–925.
 41. Гранкина А.О., Боcharникова Е.А., Матыченков В.В. Влияние кремнийсодержащих биостимуляторов на холодостойкость пшеницы и сахарной свеклы // *Агрохимия.* 2022. № 8. С. 22–28.
 42. Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мchedлов-Петросян О.П. Термодинамика силикатов. М.: Недра, 1972. 145 с.
 43. Iler R.K. The Chemistry of silica // N.Y.: Wiley, 1979. 896 p.
 44. Матыченков В.В. Роль подвижных соединений кремния в растениях и системе почва–растение: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Пушино, 2008. 40 с.
 45. Матыченков В.В., Кособрухов А.А., Шабнова Н.И., Боcharникова Е.А. Кремниевые удобрения как фактор повышения засухоустойчивости растений // *Агрохимия.* 2007. № 5. С. 63–67.
 46. Artyszak A., Klarzynska E., Litwinczuk-Bis M., Siuda A. Profitability of sugar beet foliar nutrition with silicon // *Ann. Polish Associat. Agricult. Agrob. Econom.* 2019. V. 21. № 1. P. 17.
 47. Corozo Liliana, Arteaga Alcívar Francisco, Cuenca Edison, Salas Carlos, Delgado María, Montes Escobar Karime, Monteros-Altamirano Alvaro, Ponce Macías. Effect of organic and chemical fertilization on the onion crop (*Allium cepa* L.) // *J. Centr. Europ. Agricult.* 2020. V. 21. P. 522–530.
 48. Kowalska J., Tyburski J., Jakubowska M., Krzysińska J. Effect of different forms of silicon on growth of spring wheat cultivated in organic farming system // *Silicon.* 2021. V. 13. № 1. P. 211–217.
 49. Niewiadomska A., Sulewska H., Wolna-Maruwka A., Ratajczak K., Waraczewska Z., Budka A. The influence of bio-stimulants and foliar fertilizers on yield, plant features, and the level of soil biochemical activity in white lupine (*Lupinus albus* L.) cultivation // *Agronomy.* 2020. V. 10. № 1. P. 150.
 50. Wadas W. Possibility of increasing early potato yield with foliar application of silicon // *Agron. Sci.* 2022. V. 77. № 2. P. 949–954.
 51. Gao M., Zhou J., Liu H., Zhang W., Hu Y., Liang J., Zhou J. Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 631–632. P. 1100–1108.
 52. Wei X., Matichenkov V.V., Bocharnikova E.A., Zhan Q., Matichenkov I.V. Reduction of Cd, Cu, Ni and Pb mobility by active Si // *Agricult. Sci. Technol.* 2015. V. 16. № 1. P. 182.
 53. Grankina A., Bocharnikova E., Matichenkov V. Silicon-based biostimulators // *Biostimulants for crop production and sustainable agriculture.* CAB International, 2022. P. 85.
 54. Abd-Elall E.H., Hussein M. Foliar application of micro silica, potassium chloride and calcium chloride enhances yield and fruit quality of Balady orange tree // *Alexandria Sci. Exchange J.* 2018. V. 39. P. 387–393.
 55. Sabaghnia N., Janmohammadi M. Effect of nano-silicon particles application on salinity tolerance in early growth of some lentil genotypes // *Ann. Univer. Mariae Curie-Sklodowska. Sectio C; Biol.* 2015. V. 69. № 2. P. 39.
 56. Siddiqui M.H., Al-Whaibi M.H., Faisal M., Al Sahli A.A. Nano-silicon dioxide mitigates the adverse effects of salt stress on *Cucurbita pepo* L. // *Environ. Toxicol. Chem.* 2014. V. 33. № 11. P. 2429–2437.
 57. Hussain A., Rizwan M., Ali Q., Ali S. Seed priming with silicon nanoparticles improved the biomass and yield while reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat grains // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019. V. 26. № 8. P. 7579–7588.
 58. Karunakaran G., Suriyaprabha R., Manivasakan P., Yuvakkumar R., Rajendran V., Prabhu P., Kannan N. Effect of nanosilica and silicon sources on plant growth promoting rhizobacteria, soil nutrients and maize seed germination // *IET Nanobiotechnol.* 2013. V. 7. № 3. P. 70–77.
 59. Wang S., Wang F., Gao S. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015. V. 22. № 4. P. 2837–2845.
 60. Dhakate P., Kandhol N., Raturi G., Ray P., Bhardwaj A., Srivastava A., Tripathi D.K. Silicon nanoforms in crop improvement and stress management // *Chemosphere.* 2022. V. 305. P. 135–165.

61. Golubkina N., Logvinenko L., Kononov D., Garsiya E., Fedotov M., Alpatov A., Caruso G. Foliar application of selenium under nano silicon on *Artemisia Annua*: Effects on yield, antioxidant status, essential oil, artemisinin content and mineral composition // *Horticulturae*. 2022. V. 8. № 7. P. 597.
62. Park H.J., Kim S.H., Kim H.J., Choi S.H. A new composition of nanosized silica-silver for control of various plant diseases // *Plant Pathol. J.* 2006. V. 22. № 3. P. 295–302.
63. Johnson S.N., Hartley S.E., Ryalls J.M., Frew A., Hall C.R. Targeted plant defense: silicon conserves hormonal defense signaling impacting chewing but not fluid-feeding herbivores // *Ecology*. 2021. V. 102. № 3. e03250.

Si-Based Biostimulators

A. O. Grankina

*Institute Basic Biological Problems RAS
Institutskaya ul. 2, Moscow region, Serpukhov district, Pushchino 142290, Russia,
E-mail: 9265260049@bk.ru*

Biostimulants are a new type of agrochemicals that are highly effective when applying low doses (up to 10 kg/ha). The interest in the use of biostimulants is confirmed by the appearance of not only scientific papers, but also the formation in various countries of legislative bases regulating the use and classification of this type of substances in agriculture. Thanks to the influence of silicon-containing compounds as biostimulators of plant growth, several tasks of modern agriculture can be comprehensively solved: to minimize the effects of stress factors, to reduce the use of pesticides and fertilizer doses, to improve the quality of products, to stop soil degradation. The range of global manufacturers of silicon biostimulants is represented by liquid (mono-silicon acid) or solid (amorphous silica or silica gel) forms. There are several silicon-mediated mechanisms that provide plant protection in conditions of biotic and abiotic stress. There is a hypothesis of the influence of silicon on the signaling system of plants, which requires additional research.

Keywords: biostimulants, silicon.