

УДК 631.559:633.15:581.132.1:631.811.93

УРОЖАЙНОСТЬ КУКУРУЗЫ И СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРОФИЛЛА В РАСТЕНИЯХ ПРИ ВНЕСЕНИИ В ПОЧВУ КРЕМНИЕВЫХ УДОБРЕНИЙ

© 2013 г. В.В. Матыченков¹, А.А. Кособрюхов¹, Е.А. Бочарникова²¹Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пуцино, Россия

E-mail: vvmatichenkov@rambler.ru

²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пуцино, Россия

Поступила в редакцию 24.07.2012 г.

В условиях микрополевого опыта проведено исследование влияния кремниевых удобрений на накопление биомассы растениями кукурузы, содержание хлорофилла и каротиноидов в листьях. Внесение аморфного кремнезема в почву приводило к увеличению доступного фосфора и кремния в почвенном растворе и положительно влияло на накопление биомассы растениями. Установлена тесная корреляционная зависимость между предложенным параметром характеристики кремниевого состояния почвы, названным актуальным кремнием, накоплением биомассы растениями и содержанием хлорофилла.

Ключевые слова: урожайность кукурузы, хлорофилл, кремниевые удобрения, актуальный кремний.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время интерес к кремнию, его роли в физиологии растений существенно увеличился. Это нашло отражение в возросшем количестве публикаций и конференций, посвященных исследованиям влияния кремния на растения и плодородие почвы [1–4]. Причинами повышенного интереса к данному элементу являются новые данные, свидетельствующие о важности кремния в физиологических процессах растений [5–7], обеспечении их защиты от неблагоприятных условий [1, 6], а также появление новых методик исследования этого элемента в растениях [8–10].

Кремний является неотъемлемым компонентом растений. Его содержание в золе растений изменяется от 0.16 до 8.4% и более [11, 12]. Поглощение Si происходит в форме монокремниевой кислоты и ее аниона [5, 12]. С помощью современных методов было показано, что транспорт кремния в растительных тканях осуществляется с помощью специализированных транспортных белков [7]. В листьях кремний локализуется в эпидермальных тканях в виде тонкого слоя кремне-целлюлозной мембраны и связывается с пектином и кальцием [13]. Таким образом, образуется двойной кутикулярный слой, защищающий и механически укрепляющий расте-

ния [5] и предотвращающий избыточное испарение влаги листьями [14].

Часть поглощенной растением монокремниевой кислоты расходуется на синтез кремнийсодержащих клеточных и межклеточных структур – фитолитов [15]. Кремний присутствует в рибосомах [16], митохондриях, хлоропластах, микросомах [17]. В ряде исследований было показано, что оптимизация кремниевого питания приводит к увеличению стабильности молекул ДНК и РНК [18, 19].

Улучшение кремниевого питания растений способствует развитию корневой системы, увеличению массы корней на 20–50% [5, 20, 21], повышению интенсивности их дыхания [22].

Использование кремния в виде удобрений приводит к повышению скорости фотосинтеза [23, 24], что может быть связано с увеличением содержания фотосинтетических пигментов, повышением активности рибулозобисфосфаткарбоксилазы [20].

Растения поглощают кремний в количествах, часто превышающих количество фосфора, калия и азота [12, 19, 25]. С каждым годом появляется все больше данных, свидетельствующих о важной роли данного элемента в физиологических процессах растений. Участие кремния в этих процессах изучено крайне слабо.

Цель работы – изучение зависимости между внесением кремниевых удобрений в почву и содержанием хлорофилла в листьях кукурузы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение содержания хлорофилла проводили в листьях кукурузы сорта Стерлинг, выращенной в микрополевоом эксперименте на территории биостанции “Чашниково”, расположенной на севере Московской обл. Кремниевое удобрение (аморфный диоксид кремния – препарат аэросил марки А-30) вносили в дозах 0, 30, 100, 500, 1000 и 3000 кг/га. Микроделяночный эксперимент проводили на целинной дерново-подзолистой почве (pH_{H_2O} 6.37, pH_{KCl} 5.43, $C_{орг}$ – 2.02%). Площадь одной площадки была равна 2 м², размер внутренних защитных полос – 0.2 м, внешних – 0.5 м. Повторность опыта четырехкратная.

Во время эксперимента погодные условия были характерными для севера Московской обл., без аномалий. В одной части вариантов опыта кремниевое удобрение вносили только в первый год, в другой – ежегодно в течение 2-х лет. Посев семян кукурузы проводили в конце мая. Образцы листьев для проведения анализов отбирали в середине августа у 2-месячных растений. Уборку биомассы кукурузы производили в конце сентября. В листьях среднего яруса определяли общее содержание кремния и фосфора с использованием стандартных методик [26, 27]. Определение содержания хлорофилла и каротиноидов проводили в листьях 2-месячных растений 2-го года эксперимента по методу [28] с использованием 100%-ного ацетона. Одновременно отбирали образцы почвы из пахотного горизонта для определения в них водорастворимых форм кремния (мономеров и полимеров кремниевой кислоты), кислоторастворимого кремния и доступного

для растений фосфора с использованием стандартных и разработанных авторами методик [8, 29].

Статистическую обработку данных проводили в приложении Excel. Значимость различий оценивали по *t*-критерию Стьюдента ($p \leq 0.05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Внесение аморфного кремнезема в почву способствовало увеличению накопления растениями сырой биомассы как в 1-й, так и во 2-й год исследования (табл. 1). Наибольший эффект от внесения аморфного кремния был получен в первый год при дозе Si100, во второй год – при дозе Si1000.

Более высокая эффективность дозы Si100, по сравнению с большими дозами, в 1-й год эксперимента могла быть связана с образованием поликремниевых кислот в почве при увеличении дозы кремниевого удобрения, что, возможно, привело к уменьшению концентрации монокремниевой кислоты. Этот феномен описан авторами в работах [29, 30], когда при увеличении дозы кремниевых удобрений, внесенных в почву, в первую очередь повысилась концентрация монокремниевой кислоты, которая является основным действующим веществом, влияющим на свойства почвы и на растения. Содержание поликремниевой кислоты при этом существенно не изменялось. Однако при достижении определенной концентрации монокремниевой кислоты в почве начинается процесс ее полимеризации. В результате, при дальнейшем повышении дозы кремниевого удобрения наблюдали снижение концентрации монокремниевой кислоты в почве. В случае внесения еще более высоких доз кремниевых удобрений количество образующейся монокремниевой кислоты было достаточным как для повышения ее концентрации в почве, так и для процесса полимеризации. Поэтому кремниевые

Таблица 1. Влияние аморфного тонкодисперсного кремнезема на урожайность кукурузы

Вариант, кг SiO ₂ /га	1-й год	2-й год	
		Внесение кремнезема в 1-й год	Ежегодное внесение кремнезема
т сухой зеленой массы/га			
Контроль без удобрений	7.68±0.34	6.84±0.16	
30	8.56±0.12	7.95±0.21	8.59±0.20
100	11.8±0.15	9.34±0.15	12.54±0.12
500	8.89±0.12	10.54±0.12	11.43±0.15
1000	9.12±0.15	11.54±0.17	12.76±0.11
3000	10.64±0.27	10.84±0.21	11.83±0.22

Таблица 2. Содержание кислоторастворимых форм фосфора, кремния и водорастворимого кремния в почве

Вариант, кг SiO ₂ /га	Кислоторастворимый		Монокремниевая кислота, Si	Поли-кремниевая кислота, Si	Активный Si*
	Si	P			
мг/кг почвы					
Контроль без удобрений	179±10	37.9±2.7	5.32±0.10	13.4±0.1	233
После первого года внесения кремниевого удобрения					
30	223±10	48.7±3.1	9.4±0.1	9.3±0.1	317
100	253±12	49.5±1.8	11.9±0.1	10.2±0.1	372
500	219±15	48.7±3.2	9.3±0.1	18.5±0.2	312
1000	216±14	50.2±1.7	13.6±0.1	22.5±0.2	352
3000	351±12	59.6±1.5	9.5±0.1	32.6±0.2	446
После ежегодного внесения кремниевого удобрения в течение 2-х лет					
30	238±13	48.9±1.7	10.1±0.1	8.6±0.1	339
100	264±20	45.8±1.3	12.4±0.1	9.1±0.1	388
500	272±18	40.5±2.3	9.5±0.1	22.8±0.1	367
1000	287±18	42.7±2.3	10.4±0.1	34.5±0.2	391
3000	395±15	40.3±2.3	11.4±0.1	40.3±0.4	391
Коэффициент корреляции с величиной биомассы	0.56	0.02	0.65	0.59	0.73

* Обобщенный параметр, рассчитанный по формуле.

удобрения, как правило, имеют две оптимальные дозы. Величина этих доз зависит как от свойств самих кремниевых удобрений, так и от свойств почвы.

Внесение в почву аморфного кремнезема способствовало повышению доступного для растений фосфора. В предыдущих работах [1, 2, 29, 30] было показано, что внесение в почву диоксида кремния приводило к повышению содержания доступного для растений фосфора. При этом строгая зависимость между содержанием фосфора (по Кирсанову) и активным кремнием отсутствовала, что свидетельствовало о сложности происходящих в почве процессов. На содержание доступного для растений фосфора в почве влияют такие процессы, как связывание фосфора почвенными компонентами (Ca, Al, Fe), поглощение растениями и микроорганизмами, миграция фосфора по профилю почвы [1, 11]. При внесении в почву активных форм кремния появляется дополнительный фактор, влияющий на подвижность фосфора и позволяющий повышать доступность фосфора в результате реакции замещения силикат-анионами фосфат-анионов.

Определение водо- и кислоторастворимых форм кремния в почве показало (табл. 2), что наибольшим было содержание монокремниевой кислоты при внесении Si100 и Si1000 в вариантах, где удоб-

рение вносили только в первый год, и при дозах Si100 и Si3000 при внесении удобрений каждый год. Содержание поликремниевых кислот существенно повышалось при высоких дозах кремниевого удобрения.

Для характеристики кремниевого состояния почв авторами был разработан единый параметр, названный активным кремнием [8], который включает в себя содержание монокремниевой кислоты в почве в момент определения (актуальный кремний), а также количество монокремниевой кислоты, которое может быть образовано в будущем (потенциальный кремний). Содержание монокремниевой кислоты в почве в настоящий момент определяли в водной вытяжке из сырой почвы. Содержание кремния в кислотной вытяжке характеризовало потенциальный кремний.

Для определения активного кремния предложено следующее уравнение:

$$\text{Активный Si} = 10 \times \text{Актуальный Si} + \text{Потенциальный Si}$$

Коэффициент 10 для актуального кремния установлен эмпирическим путем. Однако он соответствует данным Айлера [31], показавшего, что в водный раствор переходит приблизительно 0.1

Таблица 3. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях кукурузы, мг/г сырой массы ($n = 20$)

Вариант, кг SiO ₂ /га	Хлорофиллы <i>a + б</i>	Хлорофилл <i>a</i>	Хлорофилл <i>б</i>	Каротиноиды
Контроль без удоб- рений	2.78	1.96	0.82	1.23
После первого года внесения кремниевого удобрения				
30	3.47	2.53	0.94	1.50
100	3.51	2.59	0.92	1.20
500	3.38	2.47	0.91	1.28
1000	3.59	2.59	1.00	1.29
3000	3.15	2.25	0.90	1.35
После ежегодного внесения кремниевого удобрения в течение 2-х лет				
30	3.43	2.45	0.98	1.57
100	3.74	2.70	1.04	1.35
500	3.53	2.55	0.98	1.37
1000	3.67	2.59	1.08	1.51
3000	2.83	2.00	0.83	1.25
<i>HCP</i> ₀₅	0.27	0.20	0.07	0.11

количества аморфного тонкодисперсного кремнезема, растворяющегося в кислотной вытяжке.

На основе полученных данных (табл. 2) вычислены коэффициенты корреляции между величинами биомассы кукурузы, содержания кислоторастворимых форм кремния и фосфора, а также монокремниевой и поликремниевой кислот. Коэффициент корреляции между содержанием доступного для растений фосфора и биомассой кукурузы составил 0.021. Низкая величина коэффициента свидетельствовала о том, что фосфорное питание не являлось лимитирующим фактором роста и накопления биомассы растений кукурузы для данной почвы. Коэффициенты корреляции между величинами биомассы и характеристик кремниевого состояния почвы составили 0.56, 0.59, 0.65 и 0.73 для кислоторастворимого кремния, поликремниевой кислоты, монокремниевой кислоты и активного кремния соответственно. Таким образом, предложенный авторами параметр – активный кремний – имел наиболее тесную корреляционную зависимость с величиной биомассы кукурузы, и для изученной почвы кремний являлся важным лимитирующим фактором величины урожая.

Исследование содержания хлорофилла в листьях растений показало (табл. 3), что внесение кремниевых удобрений в почву способствовало значительному повышению накопления хлорофиллов и каротиноидов в листьях растений. Наибольшее накопление хлорофиллов *a+b* в листьях растений (3.67 мг/г сырой массы) отмечено при ежегодном внесении дозы Si1000 в течение 2-х лет по сравне-

нию с 2.78 мг/г сырой массы в контроле. Содержание хлорофилла *a* в листьях было больше при внесении Si100 (2.70 мг/г сырой массы), хлорофилла *б* (1.08 мг/г сырой массы) – при дозе Si1000. Содержание каротиноидов было наибольшим в варианте внесения дозы Si30.

Величина содержания монокремниевой кислоты в почве положительно коррелировала с содержанием хлорофилла (табл. 4). Наиболее высокий коэффициент корреляции был отмечен между содержанием суммы хлорофиллов *a + б* и монокремниевой кислоты ($r = 0.86$). Для хлорофилла *a* и хлорофилла *б* данный показатель составил соответственно 0.67 и 0.69. Для других форм кремния в почве коэффициенты корреляции были отрицательными или очень низкими.

Таким образом, полученные данные показали наличие прямой зависимости между содержанием монокремниевой кислоты в почве и накоплением хлорофилла в листьях растений кукурузы. Повышенное накопление пигментов в листьях растений могло происходить в результате увеличения доступности для растений ранее связанных в почве фосфатов. Однако низкие коэффициенты корреляции (табл. 4) между величинами содержания фотосинтетических пигментов и подвижного фосфора в почве не позволили сделать однозначный вывод о прямом влиянии доступного фосфора почвы на накопление хлорофилла в листьях кукурузы. По мнению ряда исследователей [32–34], кремниевые соединения могут принимать участие в синтезе пигментов в качестве катализаторов. Также

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между величинами содержания кремния в различных вытяжках из почв и фотосинтетических пигментов в листьях кукурузы ($p < 0.001$)

Пигмент	Кислоторастворимый кремний	Кислоторастворимый фосфор	Монокремниевая кислота	Поликремниевая кислота	Активный кремний
Хлорофиллы <i>a + б</i>	-0.23	0.17	0.86	-0.18	0.22
Хлорофилл <i>a</i>	-0.23	0.28	0.67	-0.17	-0.04
Хлорофилл <i>б</i>	-0.28	0.11	0.69	-0.04	-0.04
Каротиноиды	-0.16	0.13	0.27	-0.18	-0.16

показано, что монокремниевая кислота способна повышать стабильность органелл растительной клетки [18, 19]. Однако эти предположения нуждаются в дополнительных исследованиях и доказательствах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты проведенного исследования показали, что внесение аморфного кремнезема в виде удобрения в дерново-подзолистую почву положительно влияло на накопление биомассы кукурузы и приводило к увеличению содержания пигментов фотосинтеза в листьях. Установлена тесная корреляционная зависимость между предложенным параметром характеристики кремниевого состояния почвы – актуальным кремнием и величиной биомассы кукурузы, а также между содержанием хлорофилла в листьях и содержанием монокремниевой кислоты в почве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Snyder G.H., Matichenkov V.V., Datnoff, L.E. Silicon // Handbook of Plant Nutrition. Massachusetts: University Press, 2006. P. 551–568.
2. Silicon in Food, Agriculture and Environment Proc. / Eds. Matichenkov V.V., Bochamnikova E.A. Pushchino, 2004. 45 p.
3. III Silicon in Agriculture Conference Proc. / Ed. Korndorfer G.H. Uberlandia: Universodade Federal de Uberlandia, 2005. 110 p.
4. IV Silicon in Agriculture Conference Proc. KwaZulu-Natal, South Africa, 2008. 108 p.
5. Ma J.F., Takahashi E. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. The Netherlands: Elsevier, 2002. 281 p.
6. Belanger R.R. The role silicon in plant-pathogen interaction: toward universal model // III Silicon in Agriculture Conference / Ed. Korndorfer G.H. Uberlandia: Universodade Federal de Uberlandia, 2005. P. 34–40.
7. Ma J.F., Tamai K., Yamaji N., Mitani M., Konishi S., Katsuhara M., Ishiguro M., Murata Y., Yano M. Silicon transporter in rice // Nature. 2006. V. 440. P. 688–691.
8. Матыченков В.В. Градация почв по дефициту доступного растениям кремния // Агрохимия. 2007. № 7. С. 22–31.
9. Матыченков В.В., Бочарникова Е.А., Кособроухов А.А., Биль К.Я. О подвижных формах кремния в растениях // ДАН РАН. 2008. Т. 418. № 2. С. 279–281.
10. Mitani N., Ma J.F., Iwashita T. Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa* L.) // Plant Cell Physiol. 2005. V. 46. № 2. P. 279–283.
11. Башкин В.Н. Биогеохимия. М.: Научн. мир, 2004. 584 с.
12. Epstein E. Silicon // Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 1999. V. 50. P. 641–664.
13. Waterkeyn L., Bientait A., Peeters A. Callose et silice epidermiques rapports avec la transpiration cuticulaire // La Cellule. 1982. V. 73. P. 263–287.
14. Emadian S.F., Newton R.J. Growth enhancement of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings by silicon // Plant Physiol. 1989. V. 134. № 1. P. 98–103.
15. Neumann D. Silicon in plants // Silicon Biomineralization. Progress in Molecular and Subcellular Biology / Ed. Muller W.E.G. 2003. V. 3. P. 149–160.
16. Richter W., Suntheim L. Significance of silicon in plant nutrition // Arch. fur Ackerund Pflanz. und Boden. 1986. V. 30. № 12. P. 737–744.
17. Воронков М.Г., Кузнецов И.Г. Удивительный элемент жизни. Иркутск: Восточн.-Сибир. изд-во, 1983. 256 с.
18. Алешин Н.Е., Авакян Э.Р., Лебедев Е.В. Стабилизация митохондрий риса кремнием // Докл. ВАСХНИЛ. 1990. № 2. С. 12–13.
19. Воронков М.Г., Зелчан Г.И., Лукевиц А.Ю. Кремний и жизнь. Рига: Zinatne, 1978. 578 с.
20. Adatia M.H., Besford R.T. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution // Ann. Bot. 1986. V. 58. P. 343–351.
21. Savant N.K., Korndorfer G.H., Datnoff L.E., Snyder G.H. Silicon nutrition and sugarcane production: a review // J. Plant Nutr. 1999. V. 22. № 12. P. 1853–1903.

22. Yamaguchi T., Tsuno Y., Nakano J., Mano P. Relationship between root respiration and silica:calcium ratio and ammonium concentration in bleeding sap from stem in rice plants during the ripening stage // *Japan J. Crop Sci.* 1995. V. 64. № 3. P. 529–536.
23. Agarie S., Agata W., Kubota F., Kaufman P.B. Physiological roles of silicon in photosynthesis and dry matter production in rice plants // *Japan J. Crop Sci.* 1992. V. 61. P. 200–206.
24. Kwon T.O., Lee S.B., Lee J.H., Park K.H. The influence of low temperature at the boot stage on yield and nutrient uptake of rice with application of soil improves // *Res. Rep. Rural Develop. Admin., Plant Environ., Micrology & Farm Prod. Util., Korea Rep.* 1989. V. 31. № 1. P. 14–23.
25. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
26. Матыченков В.В. Аморфный оксид кремния в дерново-подзолистой почве и его влияние на растения: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: Изд-во МГУ, 1990. 26 с.
27. Доспехов Б.А., Васильев И.П., Туликов А.М. Практикум по земледелию. М.: Агропромиздат, 1987. 383 с.
28. Шлык А.А. Определение хлорофилла и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // Биохимические методы в физиологии растений / Под ред. Павлиновой О.А. М.: Наука, 1971. С. 154–170.
29. Матыченков В.В., Аммосова Я.М., Бочарникова Е.А. Метод определения доступного для растений кремния в почвах // *Агрохимия.* 1997. № 1. С. 76–84.
30. Matichenkov V.V., Bocharnikova E.A. Si in horticultural industry // *Plant Mineral Nutrition and Pesticide management* / Eds. Dris R, Jain S.M. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 2004. V. 2. P. 217–228.
31. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 251 с.
32. Барсукова А.Г., Рочев В.А. Влияние кремнегельсодержащих удобрений на подвижность кремнекислоты в почве и доступность ее растениям // *Контроль и регулирование содержания макро- и микроэлементов в почве и растениях на Среднем Урале.* Тр. Свердл. СХИ. 1979. Т. 54. С. 84–88.
33. Banerjee A.K., Laya Mimo M.S., Vera Vegas W.J. Silica gel in organic synthesis // *Russ. Chem. Rev.* 2001. V. 70. № 11. P. 971–990.
34. Biel K.Y., Matichenkov V.V., Fomina I.R. Protective role of silicon in living systems // *Functional Foods for Chronic Diseases. Advances in the Development of Functional Foods* / Ed. Martirosyan D.M. Richardson, Texas: D&A Inc., 2008. V. 3. P. 208–231.

Productivity of Corn and the Content of Chlorophyll in Plants under Silicon Fertilization

V.V. Matychenkov¹, A.A. Kosobryukhov¹, E.A.Bocharnikova²

¹*Institute of Fundamental Problems of Biology, Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya 2, Pushchino, Moscow oblast, 142290 Russia*

²*Institute Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya 2, Pushchino, 142290 Russia, E-mail: vvmatichenkov@rambler.ru*

The effect of silicon fertilizers on the accumulation of corn biomass and the contents of chlorophyll and carotenoids in leaves has been studied in a microfield experiment. The application of amorphous silicon has increased the content of available phosphorus and silicon in the soil solution and positively affected the accumulation of corn biomass. A high positive correlation has been found between the content of active Si in the soil, corn biomass, and the content of chlorophyll.

Key words: corn productivity, chlorophyll, silicon fertilizers, content of active Si in the soil.