

ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КРЕМНИЯ НА ФОСФАТНОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ¹

© 2023 г. Е. А. Бочарникова^{1,2,*}, В. В. Матыченков^{1,2}, Г. В. Пироговская³

¹Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
ул. Институт, влад. 5, р.п. Большие Вяземы, Одинцовский р-н, Московская обл. 143050, Россия

³Институт почвоведения и агрохимии НАН республики Беларусь
220108 Минск, ул. Казинца, 90, Республика Беларусь

*E-mail: msvk@rambler.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

Образцы верхнего горизонта дерново-подзолистой целинной и пахотной почвы инкубировали с известью или суперфосфатом, затем вносили аморфный диоксид кремния в дозах от 50 до 5000 кг/га и снова инкубировали в течение 2-х нед. В почвах определяли содержание водорастворимых и кислоторастворимых форм кремния и анализировали фракционный состав соединений фосфора. Показано, что повышение концентрации монокремниевой кислоты в почвенном растворе дерново-подзолистой почвы инициировало процессы трансформации соединений фосфора, приводящие к уменьшению доли труднорастворимых форм фосфора и увеличению содержания фосфора, доступного растениям. Внесение извести или фосфорного удобрения способствовало усилению этих трансформационных процессов, что важно для разработки рекомендаций для практического применения кремниевых удобрений и снижения доз фосфорных удобрений.

Ключевые слова: активные формы кремния, фосфатное состояние, дерново-подзолистая почва.

DOI: 10.31857/S0002188123120050, **EDN:** ZSRRHJ

ВВЕДЕНИЕ

Применение фосфорных удобрений является важным условием, обеспечивающим высокие урожаи. Однако сельскохозяйственные культуры усваивают не более 20–30% внесенного фосфора, поскольку в почве данный элемент легко переходит в недоступные для растений формы или вымывается в подземные и поверхностные воды [1, 2]. Благодаря высокой реакционной способности внесенный с удобрениями фосфор быстро связывается катионами кальция и магния в нейтральных или щелочных почвах и катионами алюминия и железа — в кислых почвах [3]. Уровень фиксации Р зависит от многих факторов, включая химический состав и физические свойства почвы, дозы внесения фосфорных и других удобрений, влажность, уровень орошения и другие [4, 5].

В настоящее время фосфорные удобрения все чаще становятся источником загрязнения почв тяжелыми металлами [6, 7]. По оценкам, в европейских странах на долю фосфорных удобрений приходится 54–58% кадмия, ежегодно поступающего в окружающую среду [8]. Многие исследования направлены на разработку методов высвобождения фосфора, фиксированного почвенными компонентами. Предложено использование различных почвенных мелиорантов, органических кислот и микробиологических препаратов [9–11]. Однако уровень извлечения Р остается относительно низким, а многие предлагаемые вещества и препараты являются дорогостоящими.

В 1856 г. на Ротамстедской станции (Англия) были начаты первые полевые опыты по изучению взаимодействия кремниевых и фосфорных соединений в почве. В 1906 г. Hall и Morison предложили возможность реакции обмена фосфат-анионов на силикат-анионы при внесении в почву Si-удобрений или почвенных мелиорантов [12]. В дальнейших исследованиях было выявлено

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 117030110139-9 и 121040800103-6.

Таблица 1. Основные физико-химические свойства верхнего горизонта дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы

Дерново- подзолистая почва	С, %	рН	Глина, %	Емкость катионного обмена, мг-экв/100 г	Общий К	Общий Р	Общее Fe	Общий Са
					%			
Целинная	2.53	6.3	18.7	15.3	1.10	0.09	1.34	0.96
Пахотная	2.21	6.7	19.3	16.7	0.93	0.11	1.25	1.13
<i>HCP</i> ₀₅	0.03	0.1	1.5	1.3	0.02	0.01	0.12	0.05

но, что кремнийсодержащие соединения способны увеличивать содержание доступных для растений подвижных форм фосфора в почвах [13, 14] и повышать его доступность растениям [15].

К.Л. Аскинази и Н.М. Санникова в 1937 г. предположили [16], что монокремниевая кислота или ее анион может вытеснять фосфат-анион из фосфатов. Другая гипотеза предполагает, что внесенный в почву кремнезем способствует физической сорбции подвижного фосфора, что препятствует более прочной необменной или химической адсорбции Р, а также предотвращает вынос Р с почвенными водами [17, 18]. Кроме того, предполагают, что Si-анион может конкурировать с Р-анионом [19]. Рост содержания монокремниевой кислоты в почве ведет к смещению равновесия между фосфат- и Si-анионами, что приводит к увеличению концентрации фосфат-анионов в почвенном растворе и улучшению фосфорного питания растений [20]. Однако до сих пор процессы воздействия соединений кремния на фосфатное состояние почв изучены крайне недостаточно, что препятствует эффективному применению кремниевых препаратов в растениеводстве.

Цель работы – исследование влияния аморфного диоксида кремния на фракционный состав фосфора на примере дерново-подзолистой почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В инкубационных исследованиях были использованы образцы верхнего горизонта А1 дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы (целинной и пахотной), отобранные на севере Московской обл. (с. Чашниково). Основные свойства почвы представлены в табл. 1.

Усредненные почвенные образцы были разделены на 3 части. В одну часть образцов была добавлена химически чистая известь (CaCO_3) из расчета 1 т/га или 1 г/кг почвы. В другую часть образцов был добавлен химически чистый моногидрат дигидроортофосфата кальция $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (двойной суперфосфат) в дозе 300 кг/га или

0.3 г/кг почвы. Затем образцы с добавлением извести или суперфосфата инкубировали при температуре 20–24°C и влажности 15–18% при ежедневном перемешивании в течение 2-х нед. После чего в образцы без добавления и с добавлением извести или суперфосфата вносили аморфный кремнезем в дозах 0, 50, 100, 200, 500, 700, 1000 и 5000 кг/га, что соответствовало 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 1.0 и 5.0 г/кг почвы. Кремнезем (производство Салаватского катализаторного завода, Башкортостан) имел следующие свойства: содержание SiO_2 – 98.6–99.2%, Na – 0.30–0.41%, удельная поверхность – 160–180 м²/г, рН_{Н₂О} 7.7. После этого образцы инкубировали при указанных выше условиях в течение еще 2-х нед.

После окончания инкубации во влажных образцах определяли содержание монокремниевой кислоты. В пластиковую пробирку на 50 мл помещали навеску 6 г и заливали 30 мл дистиллированной воды. Суспензию встряхивали 1 ч, центрифугировали при 6000 об./мин в течение 10 мин. Полученный раствор немедленно анализировали на содержание монокремниевой кислоты с использованием метода Маллин–Райли, который позволяет избежать мешающее влияние фосфора [21].

Оставшиеся образцы почв высушивали при температуре 65°C в течение 4-х ч. Затем почву размалывали и просеивали через сито с ячейками 1 мм. В образцах определяли фракционный состав минерального фосфора по методу Чанга–Джексона в модификации Гинзбург–Лебедевой [22] и кислоторастворимый кремний по методике [23]. В пластиковую колбу на 50 мл помещали 2 г почвы и заливали 20 мл 0.1 н. HCl. Суспензию встряхивали в течение 1 ч и затем центрифугировали при 6000 об./мин в течение 10 мин. В полученном растворе определяли содержание кремния и кислоторастворимого фосфора.

Образцы инкубировали в трехкратной повторности. Анализы также проводили в трехкратной повторности, что позволило рассчитать наименьшую существенную разницу полученных результатов (*HCP*) с уровнем вероятности 95%.

Таблица 2. Содержание активных форм кремния в инкубированных почвах

Доза SiO ₂ , кг/га	Инкубированная почва								
	без известкования и Р-удобрений			с внесением извести			с внесением суперфосфата		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	мг/кг								
Целинная дерново-подзолистая почва									
Контроль	8.5	285	370	8.7	285	372	8.8	284	372
50	12.4	295	419	12.7	302	429	13.5	300	435
100	15.6	302	458	15.7	303	460	15.7	315	472
200	17.8	325	503	17.5	327	502	17.6	337	513
500	13.5	334	469	14.3	334	477	14.5	337	482
700	13.1	349	480	13.4	356	490	14.8	376	524
1000	15.4	358	512	16.5	365	530	16.7	374	541
5000	20.5	387	592	21.3	394	607	21.1	392	603
Пахотная дерново-подзолистая почва									
Контроль	4.8	243	291	5.1	255	306	5	254	304
50	5.7	249	306	5.8	256	314	6.2	257	319
100	6.8	254	322	6.8	265	333	7.1	265	336
200	12.4	268	392	14.5	276	421	15.3	277	430
500	10.5	278	383	10.1	283	384	11.2	284	396
700	11.3	286	399	12.3	289	412	13.5	294	429
1000	14.5	294	439	15.4	297	451	14.9	299	448
5000	15.6	324	480	16.8	315	483	17.2	320	492
НСП ₀₅	1.6	25	37	1.4	25	36	1.2	25	38

Примечание. В графе 1 — актуальный, 2 — потенциальный, 3 — активный Si.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кремниевое состояние почв, проинкубированных с добавлением диоксида кремния, извести и суперфосфата, было оценено с использованием разработанного нами метода [23]. Учитывали содержание моно-Si кислоты в водной вытяжке из свежей почвы (актуальный Si) и содержание Si в кислой (0.1 н. HCl) вытяжке из сухой почвы (потенциальный Si). На основании обоих параметров рассчитывали содержание активного кремния согласно формуле:

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

Было показано, что данный параметр наиболее точно характеризует способность почвы обеспечивать кремниевое питание растений [24, 25]. Содержание в почве актуального кремния, потенциального кремния и активного кремния представлено в табл. 2.

Полученные данные свидетельствовали о наличии линейной зависимости между концентрацией кремния в кислой вытяжке и дозой внесенного аморфного кремнезема. Концентрация монокремниевой кислоты в водной вытяжке увеличивалась при росте дозы SiO₂ от 50 до 200 кг/га, а затем уменьшалась при дозах от 200 до 700 кг/га. Дальнейшее увеличение дозы аморфного кремнезема снова привело к увеличению концентрации актуального Si. Полученные данные координируются с литературными и нашими предыдущими данными [26, 27]. Определение содержания полимеров кремниевой кислоты в водной вытяжке позволило сделать вывод, что на первом этапе внесения твердых кремниевых препаратов происходило образование только мономерной формы кремниевой кислоты, затем при достижении определенной концентрации начинали появляться полимерные формы, на образование которых расходуется монокремниевая кислота, что и приводит к уменьшению ее концентрации в почве. При внесении очень высоких доз

Таблица 3. Фракционный состав фосфора в почве при внесении извести, суперфосфата и кремнистого удобрения

Доза SiO ₂ , кг/га	Фракции фосфора					Сумма
	1	2	3	4	5	
	мг/кг					
Дерново-подзолистая целинная почва						
Контроль	31	42	37	24	26	160
50	44	45	32	20	19	160
100	46	46	31	21	18	162
200	47	43	30	19	22	161
500	41	39	32	23	24	159
700	33	44	35	23	24	159
1000	39	42	35	21	24	161
5000	49	48	28	22	15	162
Дерново-подзолистая пахотная почва						
Контроль	54	68	245	945	355	1670
50	64	81	234	930	354	1660
100	74	86	222	920	365	1670
200	78	85	213	915	356	1650
500	62	65	256	934	345	1660
700	65	64	238	944	355	1670
1000	72	73	243	921	358	1670
5000	82	82	237	915	351	1670
<i>НСП</i> ₀₅	1	3	5	5	7	
Дерново-подзолистая целинная почва + известь						
Контроль	15	32	25	56	32	160
50	32	38	30	25	34	159
100	41	44	32	23	20	160
200	45	42	34	17	21	159
500	39	34	33	26	28	160
700	30	37	37	25	30	159
1000	32	38	37	25	27	159
5000	47	45	32	21	16	161
Дерново-подзолистая пахотная почва + известь						
Контроль	32	54	226	976	374	1660
50	48	70	245	945	352	1660
100	68	82	231	932	348	1660
200	72	84	213	933	358	1660
500	43	60	223	974	357	1660
700	54	60	245	934	364	1660
1000	67	66	256	917	362	1670
5000	76	78	248	904	353	1660
<i>НСП</i> ₀₅	2	4	4	5	7	
Дерново-подзолистая целинная почва + суперфосфат						
Контроль	84	113	123	75	64	459
50	117	124	138	43	38	460

Таблица 3. Окончание

Доза SiO ₂ , кг/га	Фракции фосфора					Сумма
	1	2	3	4	5	
	мг/кг					
100	122	134	128	38	34	456
200	134	145	121	35	24	459
500	118	140	120	43	39	460
700	112	144	127	45	32	460
1000	128	136	122	32	43	461
5000	132	143	125	34	25	459
Дерново-подзолистая пахотная почва + суперфосфат						
Контроль	79	85	302	1054	443	1960
50	137	122	335	976	394	1960
100	133	138	338	965	355	1980
200	145	147	349	948	378	1970
500	122	132	387	945	382	1970
700	133	142	399	954	342	1970
1000	140	148	387	933	366	1970
5000	149	150	388	932	348	1970
НСП ₀₅	9	10	25	45	25	

кремниевых удобрений их хватает на образование как мономеров, так и полимеров кремниевой кислоты. Эти процессы были изучены нами в предыдущих исследованиях [28, 29]. Поскольку в предыдущих исследованиях было показано, что поликремниевые кислоты не влияют на подвижность фосфатов, то их определение в почве не входило в задачи данной работы.

Содержание фосфора в различных фракциях после инкубации почв представлено в табл. 3. Целинная дерново-подзолистая почва характеризовалась значительно более низкими величинами содержания фосфора в каждой фракции по сравнению с пахотной. По-видимому, это связано с тем, что в пахотную почву вносили фосфорные удобрения. При внесении аморфного кремнезема суммарное содержание фосфора в 5-ти фракциях не изменилось, однако наблюдали существенное перераспределение фосфора по фракциям. Наиболее значимое увеличение было установлено для 1-й фракции, в которую переходят наиболее растворимые и доступные для растений формы фосфора в почве. Содержание 2-й фракции фосфора также увеличилось при увеличении дозы аморфного кремнезема. Содержание 3-й фракции Р уменьшилось. При этом изменение фосфорного состояния не было линейным и имело сложный характер.

Внесение извести привело к значительному уменьшению 1-й и 2-й фракций фосфатов и значительному увеличению фосфора 3-, 4- и 5-й фракций. Суммарное содержание фосфора в целинной и пахотной дерново-подзолистой почве осталось таким же, как в почвах без внесения извести. Изменение фракционного состава фосфора при совместном внесении извести и аморфного кремнезема было аналогичным тому, что наблюдали при внесении только аморфного кремнезема, за исключением содержания 3-й фракции, которая при совместном внесении увеличилась.

Внесение суперфосфата резко повысило общее содержание Р в исследованных почвах, при этом наблюдали увеличение содержания всех 5-ти фракций Р. Внесение аморфного диоксида кремния совместно с суперфосфатом привело к существенному увеличению содержания 1-, 2- и 3-й фракций, но снизило долю фракций 4 и 5.

Для понимания процессов взаимодействия соединений фосфора и кремния были вычислены коэффициенты корреляции между формами Si и содержанием Р (табл. 4). Показали, что наиболее высокие положительные коэффициенты установлены для актуального кремния (содержание водорастворимой монокремниевой кислоты) и фосфора в 1- и 2-й фракциях.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между содержанием различных форм кремния и содержанием фосфора во фракциях в почве

Формы Si	Фракции P				
	1	2	3	4	5
Дерново-подзолистая целинная почва					
Актальный Si	0.817	0.515	−0.841	−0.509	−0.695
Потенциальный Si	0.266	0.228	−0.375	0.039	−0.285
Активный Si	0.590	0.404	−0.662	−0.260	−0.534
Дерново-подзолистая пахотная почва					
Актальный Si	0.698	0.037	0.003	−0.531	−0.242
Потенциальный Si	0.614	−0.045	0.191	−0.398	−0.336
Активный Si	0.677	0.004	0.079	−0.487	−0.285
Дерново-подзолистая целинная почва + известь					
Актальный Si	0.892	0.835	0.518	−0.779	−0.861
Потенциальный Si	0.506	0.405	0.660	−0.527	−0.496
Активный Si	0.745	0.661	0.626	−0.696	−0.723
Дерново-подзолистая пахотная почва + известь					
Актальный Si	0.725	0.327	0.282	−0.715	−0.089
Потенциальный Si	0.606	0.155	0.465	−0.673	−0.134
Активный Si	0.702	0.279	0.346	−0.716	−0.105
Дерново-подзолистая целинная почва + суперфосфат					
Актальный Si	0.916	0.812	−0.138	−0.875	−0.861
Потенциальный Si	0.616	0.798	−0.308	−0.647	−0.596
Активный Si	0.803	0.852	−0.240	−0.800	−0.764
Дерново-подзолистая пахотная почва + суперфосфат					
Актальный Si	0.678	0.809	0.787	−0.789	−0.658
Потенциальный Si	0.581	0.723	0.862	−0.743	−0.702
Активный Si	0.661	0.798	0.830	−0.791	−0.687

Зависимость между величиной параметра активного кремния и 1-й фракцией фосфора была значительно слабее, кроме дерново-подзолистой пахотной почвы при внесении суперфосфата. Коэффициенты корреляции между фосфором 1-й фракции и потенциальным кремнием были еще меньше. Характерно, что в обеих почвах при внесении суперфосфата получены высокие коэффициенты корреляции между 2-й фракцией фосфора и всеми 3-мя параметрами содержания форм кремния.

Коэффициенты корреляции между 3-й фракцией фосфора и параметрами кремния были отрицательными для целинной почвы, но в целинной почве при совместном внесении диоксида кремния и извести и в пахотной почве при совместном внесении диоксида кремния и суперфосфата были отмечены высокие положительные коэффициенты. Корреляция между фосфором 4-й и 5-й фракций и параметрами кремния была

почти всегда отрицательной. Полученные данные позволили высказать предположения о процессах трансформации соединений фосфора в почве под влиянием аморфного диоксида кремния, извести и фосфорного удобрения, что также было показано в других исследованиях [30]. Поскольку в дерново-подзолистой почве присутствуют соединения фосфора с железом, алюминием и кальцием (особенно при внесении извести), можно предположить, что увеличение содержания подвижного фосфора (фракции 1 и 2) при внесении аморфного диоксида кремния приводит к образованию соответствующих силикатов.

ВЫВОДЫ

1. Полученные результаты свидетельствовали о потенциальной эффективности кремниевых удобрений в регулировании фосфорного питания растений в дерново-подзолистых почвах. Рост

концентрации монокремниевой кислоты в почве инициировал процессы трансформации соединений фосфора, приводящие к снижению доли труднорастворимых форм фосфора и увеличению доступного фосфора для растений.

2. Внесение извести или фосфорных удобрений способствовало усилению активности данных процессов, что чрезвычайно важно для практического применения кремниевых удобрений, в частности, с целью снижения доз таких ценных минеральных удобрений, как фосфорные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Herrera-Estrella L., López-Arredondo D.* Phosphorus: the underrated element for feeding the world // *Trends Plant Sci.* 2016. V. 21. № 6. P. 461–463.
2. *Hegedűs M., Tóth-Bodrogi E., Németh S., Somlai J., Kovács T.* (2017). Radiological investigation of phosphate fertilizers: Leaching studies // *Journal of environmental radioactivity.* 2017. V. 173. P. 34–43.
3. *Mamathashree C.M., Girijesh G.K., Vinutha B.S.* Phosphorus dynamics in different soils // *J. Pharmacogn. Phytochem.* 2018. V. 7. № 1. P. 981–985.
4. *Syers J.K., Johnston A.E., Curtin D.* Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use // *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin.* 2008. V. 18. № 108.
5. *Baninajarian S., Shirvani M.* Use of biochar as a possible means of minimizing phosphate fixation and external P requirement of acidic soil // *Journal of Plant Nutrition.* 2020. V. 44. № 1. P. 59–73.
6. *de Boer M.A., Wolzak L., Slootweg J.C.* Phosphorus: Reserves, production, and applications // *Phosphorus recovery and recycling.* Singapore: Springer, 2019. P. 75–100.
7. *Li H.* Input of Cd from agriculture phosphate fertilizer application in China during 2006–2016 // *Science of the Total Environment.* 2020. V. 698. P. 134149.
8. *Tirado R., Allsop M.* Phosphorus in agriculture: problems and solutions // *Greenpeace Research Laboratories Technical Report (Review).* 2012 (greenpeace.org).
9. *Billah M. et al.* Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: Keys for sustainable agriculture // *Geomicrobiology Journal.* 2019. V. 36. № 10. P. 904–916.
10. *Mosa A., El-Ghamry A., Tolba M.* Functionalized biochar derived from heavy metal rich feedstock: phosphate recovery and reusing the exhausted biochar as an enriched soil amendment // *Chemosphere.* 2018. V. 198. P. 351–363.
11. *Wilfert P., Meerdink J., Degaga B., Temmink H., Korving L., Witkamp G.J., ... van Loosdrecht M.C.M.* Sulfide induced phosphate release from iron phosphates and its potential for phosphate recovery // *Water Res.* 2020. V. 171. 115389.
12. *Hall A.D., Morrison C.G.T.* On the function of silica in the nutrition of cereals // *Proc. R. Soc. Lon.* 1906. Ser. B. V. LXXVII. P. 455–477.
13. *Матыченков В.В., Бочарникова Е.А.* Использование некоторых отходов металлургической промышленности для улучшения фосфорного питания и повышения засухоустойчивости растений // *Агрохимия.* 2003. № 5. С. 50–56.
14. *Швейкина Р.В.* Влияние кремнегеля содержащих удобрений на обменную адсорбцию катионов // *Свойства почв и рациональное использование удобрений.* Пермь: Изд-во Перм. с.-х. инст., 1986. С. 54–56.
15. *Куликова А.Х.* Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск: Изд-во Ульяновской ГСХА, 2012. 178 с.
16. *Аскинази Д.Л., Санникова Н.М.* Пути повышения на красноземе доступности растениям P_2O_5 . В кн. *Новое в удобрении*, М., Сельхозгиз, 1937. С. 88–103.
17. *Matichenkov V., Bocharnikova E., Campbell J.* Reduction in nutrient leaching from sandy soils by Si-rich materials: Laboratory, greenhouse and filed studies // *Soil Tillage Res.* 2020. V. 196. 104450.
18. *Owino-Gerroh C., Gascho G.J.* Effect of silicon on low pH soil phosphorus sorption and on uptake and growth of maize // *Communications in soil science and plant analysis.* 2005. T. 35. № 15–16. С. 2369–2378.
19. *Feng X., Wang X., Zhu M., Koopal L. K., Xu H., Wang Y., Liu F.* Effects of phosphate and silicate on the transformation of hydroxycarbonate green rust to ferric oxyhydroxides // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2015. V. 171. P. 1–14.
20. *Olivera M.G.* Silica and phosphorus reciprocal adsorption and discation in two latosols from the Frian-gilo Mineiro area Brazil // *Revesta Ceres.* 1986. V. 33. № 189. P. 441–448.
21. *Mullin J.B., Riley J.P.* The colorimetric determination of silicate with special reference to sea and natural waters // *Anal Chim Acta.* 1955. V. 12. P. 162–176. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)87825-3](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)87825-3)
22. *Агрохимические методы исследования почв /* Под ред. Соколова А.В. М.: Наука, 1975. 106 с.
23. *Матыченков В.В., Аммосова Я.М., Бочарникова Е.А.* Метод определения доступного для растений кремния в почвах // *Агрохимия.* 1997. № 1. С. 76–84.
24. *Матыченков В.В.* Градация почв по дефициту доступного растениям кремния // *Агрохимия.* 2007. № 7. С. 22–30.
25. *Матыченков В.В., Шнайдер Г.С.* Подвижные соединения кремния в некоторых почвах Южной Флориды // *Почвоведение.* 1996. № 12. С. 1448–1453.
26. *Матыченков В.В., Бочарникова Е.А., Аммосова Я.М.* Влияние кремниевых удобрений на растения и почву // *Агрохимия.* 2002. Т. 2. С. 86–93.
27. *Козлов А.В., Куликова А.Х., Уромова И.П.* Подвижность силикатов, показатели плодородия дерново-подзолистой почвы, биоаккумуляция кремния и продуктивность сельскохозяйственных культур под действием цеолита // *Сельскохозяйственная биология.* 2021. Т. 56. № 1. С. 183–198.
28. *Матыченков В.В., Бочарникова Е.А., Аммосова Я.М.* Влияние кремниевых удобрений на растения и почву // *Агрохимия.* 2002. Т. 2. С. 86–93.

29. Бочарникова Е.А., Пахненко Е.П., Матыченков В.В., Матыченков, И.В. Влияние оптимизации кремниевого питания на устойчивость ДНК ячменя // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2014. № 2. С. 40–43.
30. Матыченков И.В., Пахненко Е.П. Изменение содержания подвижных фосфатов почвы при внесении активных форм кремния // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. № 3 (23). С. 24–28.

Effect of Active Si on Phosphate State in Sod-Podzolic Soils

E. A. Bocharnikova^{a,b,#}, V. V. Matichenkov^{a,b}, and G. V. Pirogovskaya^c

^a*Institute Basic Biological Problems RAS
Institutskaya ul. 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

^b*All-Russian Scientific-Research Institute of Phytopathology
ul. Institute, pos. 5, Moscow region, Odintsovo district, r.p. Bolshye 143050, Russia*

^c*Institute of Soil Science and Agrochemistry of the NAS of the Republic of Belarus
ul. Kazinets 90, Minsk 220108, Republic of Belarus*

[#]*E-mail: msvk@rambler.ru*

Samples of the upper horizon of sod-podzolic virgin and arable soil were incubated with lime or superphosphate, then amorphous silicon dioxide was introduced in doses from 50 to 5000 kg/ha and incubated again for 2 weeks. The content of water-soluble and acid-soluble forms of silicon in soils was determined and the fractional composition of phosphorus compounds was analyzed. It is shown that an increase in the concentration of monosilicon acid in the soil solution of sod-podzolic soil initiated the processes of transformation of phosphorus compounds, leading to a decrease in the proportion of insoluble forms of phosphorus and an increase in the phosphorus content available to plants. The introduction of lime or phosphorus fertilizer contributed to the strengthening of these transformational processes, which is important for the development of recommendations for the practical application of silicon fertilizers and the reduction of doses of phosphorus fertilizers.

Keywords: active forms of silicon, phosphate state, sod-podzolic soil.