

## ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КРЕМНИЯ НА ФОСФАТНОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ<sup>1</sup>

© 2023 г. Е. А. Бочарникова<sup>1,2,\*</sup>, В. В. Матыченков<sup>1,2</sup>, Г. В. Пироговская<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup>Институт 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

<sup>1</sup> 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-<br>подзолистая почва | С, % | рН  | Глина,<br>% | Емкость катионного<br>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> <sub>05</sub>      | 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 ( $\text{CaCO}_3$ ) 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  $\text{SiO}_2$  – 98.6–99.2%, Na – 0.30–0.41%, удельная поверхность – 160–180 м<sup>2</sup>/г, рН<sub>Н<sub>2</sub>О</sub> 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 <sub>2</sub> ,<br>кг/га   | Инкубированная почва               |     |     |                     |     |     |                          |     |     |
|------------------------------------|------------------------------------|-----|-----|---------------------|-----|-----|--------------------------|-----|-----|
|                                    | без известкования<br>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 <sub>05</sub>                  | 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 SiO<sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> , 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> <sub>05</sub>                         | 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> <sub>05</sub>                         | 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 <sub>2</sub> , 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  |
| НСР <sub>05</sub>                                | 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 // *Revista 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<sup>a,b,#</sup>, V. V. Matichenkov<sup>a,b</sup>, and G. V. Pirogovskaya<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*Institute Basic Biological Problems RAS  
Institutskaya ul. 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

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

<sup>c</sup>*Institute of Soil Science and Agrochemistry of the NAS of the Republic of Belarus  
ul. Kazinets 90, Minsk 220108, Republic of Belarus*

<sup>#</sup>*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.