

## ВЛИЯНИЕ ЖЕЛЕЗОРЕДУЦИРУЮЩИХ И ЖЕЛЕЗООКИСЛЯЮЩИХ МИКРООРГАНИЗМОВ НА ПОДВИЖНОСТЬ ПОЛИВАЛЕНТНЫХ КАТИОНОВ И ФОСФАТОВ В ПОЧВЕ

В. И. САВИЧ, А. А. ВАНЬКОВА, Д. РАЙ ВЕРМЕ,  
Г. ЛОТОВА, Е. В. НАУМОВА

(Кафедры почвоведения и микробиологии)

Изучали влияние анаэробных микроорганизмов на подвижность Fe и Mn в почве, соотношение подвижных форм  $(Ca+Mg):(Fe+Mn)$ , количество водорастворимых и кислоторастворимых фосфатов. Предлагается вносить железоредуцирующие микроорганизмы совместно с соломой под сельскохозяйственные культуры, возделываемые на карбонатных почвах.

Аэробные и анаэробные микроорганизмы, в том числе железоокисляющие и железовосстанавливающие, оказывают влияние на процессы, протекающие в почве, и на ее плодородие. Это прежде всего связано с окислением и восстановлением соединений Fe и Mn, что приводит к изменению их подвижности и доступности для растений. Важное значение для данного процесса имеют рН среды, ионная сила раствора, содержание водорастворимых соединений Fe и Mn, количество органического вещества, которое является энергетическим материалом для микроорганизмов, донором и акцептором протонов и электронов в почвенной системе [4—6]. Между тем при наличии устойчивых комплексов органических лигандов с Fe и Mn изменяется стандартный потенциал их окисления и восстановления [5], а следовательно, и возможность окисления и восстановления микроорганизмами. Изменение состояния соединений Fe и Mn в почвах сказывается на подвижности фосфатов поливалентных металлов, азотном режиме, структурном состоянии почв [1, 2]. Пред-

ставляет интерес выяснение влияния железоредуцирующих (Red) и железоокисляющих (OX) микроорганизмов на свойства почв, в том числе на подвижность поливалентных катионов и фосфатный режим.

В карбонатных почвах подвижность Fe и Mn небольшая, поэтому для повышения урожайности сельскохозяйственных культур, возделываемых на данных почвах, необходимо повысить подвижность этих элементов, что может быть достигнуто их восстановлением микробиологическим путем при активизации деятельности железо- и марганецредуцирующих микроорганизмов.

Фосфатный режим почв в значительной степени определяет урожайность сельскохозяйственных культур. Однако при использовании интенсивных технологий их выращивания возникает ряд проблем, связанных с уменьшением эффективности применения удобрений. При высокой насыщенности почв фосфатами уменьшается подвижность ряда микроэлементов. Внесение фосфорных удобрений в почвы, богатые подвижными полу-

торными окислами, не приводит к существенному увеличению концентрации водорастворимых фосфатов. Несомненный интерес представляет поиск путей регулирования эффективной растворимости фосфорных удобрений в почвах. Полученные ранее данные показали [2], что эффективная растворимость фосфатов в дерново-подзолистых почвах возрастает при подкислении среды, повышении степени гумусированности, расширении отношения подвижных форм соединений Ca:Fe, т. е. при увеличении во фракционном составе фосфатов доли одно- и двузамещенных фосфатов Ca и Mg, а также органических фосфатов. Очевидно, что внесение в почву железоредуцирующих микроорганизмов или активизация их деятельности будут способствовать восстановлению  $Fe^{3+}$ , образованию большего количества более растворимых фосфатов двухвалентного Fe, нежели фосфатов трехвалентного Fe, увеличению содержания водорастворимых фосфатов. В том случае, когда данный процесс идет только в прикорневой зоне, повышение содержания подвижных фосфатов не сопровождается ухудшением агрономических свойств почв, обусловленных развитием анаэробнозиса. Настоящая работа посвящена проверке высказанных гипотез.

Объектом исследования служили дерново-подзолистые почвы совхоза «Восход» Московской области (№ 1 — дерново-слабоподзолистая, № 2 — дерново-среднеподзолистая), лугово-черноземная почва Краснодарского края [2—4], серозем (разр. 1), пойменная (разр. 2) и бурая пустынная (разр. 3) почвы Индии. Проводили модельные опыты и аналитические исследования.

В опыте 1 образцы почв увлажняли до оптимальной влажности и компостировали 10 дней. При этом в

середину образца массой 100 г для оценки изменения подвижности фосфатов в зоне внесения удобрений вносили 1 г  $KH_2PO_4$  (1-й вариант),  $KH_2PO_4 + 1$  мл суспензии микроорганизмов *Clostridium pasteurianum* (2-й вариант);  $KH_2PO_4 + 1$  мл суспензии микроорганизмов *Metallogenium* sp. (3-й вариант). Титр бактериальной суспензии —  $10^6$  клеток/мл. По истечении заданного периода времени из зоны внесения сорбатов и остальной массы почвы при общей 8-кратной повторности определений брали навески почвы. Последовательно в водной вытяжке при отношении почва:H<sub>2</sub>O=1:2 и в вытяжке 0,2 н. HCl при отношении почва: десорбент = 1:2 и времени десорбции 1 ч определяли количество Ca, Mg, Fe и Mn на атомном адсорбционном спектрофотометре,  $P_2O_5$  — на электрофотоколориметре по Труогу.

В опыте 2 оценивали комплексобразующую способность 12 штаммов железooksисляющих и железовосстанавливающих микроорганизмов по отношению к Fe [3]. В дистиллированную воду вносили избыток  $Fe_2O_3$  (контрольный вариант) и  $Fe_2O_3 +$  окисляющие или железовосстанавливающие микроорганизмы (опытные варианты). Через 3, 6, 7 сут определяли pH и Eh потенциометрически, содержание Fe в растворе — на атомном абсорбционном спектрофотометре. Для оценки природы образуемых комплексов в препаратах сухой биомассы микроорганизмов были сняты инфракрасные спектры с использованием КВг техники.

В опыте 3 почву (10 г) увлажняли до полной влагоемкости, для оценки подвижности Fe в зоне внесения удобрений добавляли 0,5 г соломы и 1 мл суспензии микроорганизмов (1-й вариант) и одну солому (2-й вариант); контролем служил вариант без добавления соло-

мы и микроорганизмов. Через 7 дней в почве определяли Eh, в фильтрате из суспензии почва:вода=1:2 — содержание железа при воздействии в течение 1 сут. Остаток почвы заливали 0,1 н. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при отношении почва:раствор=1:5 и через 1 ч в фильтрате также определяли содержание Fe на атомном абсорбционном спектрофотометре.

Таблица 1

Изменение подвижности соединений Ca, Mg, Fe и Mn в почвах (мг/л) при внесении KН<sub>2</sub>Р<sub>0</sub><sub>4</sub>, железоредуцирующих и железоокисляющих микроорганизмов по сравнению с контролем

Вариант	Ca	Mg	(Ca+Mg): :(Fe+Mn)
---------	----	----	----------------------

*Дерново-подзолистая почва № 1*

KН <sub>2</sub> Р <sub>0</sub> <sub>4</sub>	-15,1	+1,9	-35,0
	-186,4	-60,2	-9,3
+ Red	-14,7	0	-36,0
	-190,4	-60,0	-10,4
+ OX	-16,7	-2,6	-35,1
	-189,4	-60,9	-10,4

*Дерново-подзолистая почва № 2*

KН <sub>2</sub> Р <sub>0</sub> <sub>4</sub>	-16,3	-0,6	+2,7
	-718,0	-185,3	-32,9
+ Red	-15,4	+1,1	+0,6
	-713,0	—	—
+ OX	-15,2	-0,8	0
	-733,5	-168,8	-31,7

*Лугово-черноземная почва*

KН <sub>2</sub> Р <sub>0</sub> <sub>4</sub>	-22,4	+1,5	-47,1
	-274,0	-2,0	-3,8
+ Red	-21,0	+1,9	-68,1
	-502,5	-46,0	-6,5
+ OX	-21,6	+1,9	-69,6
	-501,0	-54,5	-5,1

Примечание. Здесь и в табл. 2 и 3 числитель — десорбент Н<sub>2</sub>О, знаменатель — НСl.

Как видно из данных табл. 1, при внесении в почву фосфатов и фосфатов совместно с железоокисляющими и железовосстанавливающими микроорганизмами содержание подвижных Ca и Mg уменьшается, а соотношение (Ca+Mg):(Fe+Mn) сужается. Одновременное внесение в почву фосфатов и железоредуцирующих микроорганизмов привело к увеличению подвижности Fe и Mn и сужению отношения подвижных форм (Ca+Mg):(Fe+Mn). Внесение железоокисляющих микроорганизмов по сравнению с применением KН<sub>2</sub>Р<sub>0</sub><sub>4</sub> неоднозначно повлияло на подвижность Fe и Mn (табл. 2).

При внесении железоредуцирующих микроорганизмов в почву содержание водорастворимых фосфатов в ней увеличивается, а железо-

Таблица 2

Изменение подвижности соединений Fe и Mn в почвах (мг/л) при внесении железоредуцирующих и железоокисляющих микроорганизмов по сравнению с внесением KН<sub>2</sub>Р<sub>0</sub><sub>4</sub>

Вариант	Fe	Mn	(Ca+Mg): :(Fe+Mn)
---------	----	----	----------------------

*Дерново-подзолистая почва № 1*

+ Red	+0,98	+0,43	-2,1
	-3,7	-5,6	—
+ OX	+0,4	+0,1	-2,7
	-24,2	-12,7	+1,2

*Дерново-подзолистая почва № 2*

+ Red	+0,3	+0,2	-1,0
	+3,9	+15,0	-0,1
+ OX	0	-1,0	-0,1
	+9,2	+8,9	-0,1

*Лугово-черноземная почва*

+ Red	+3,0	+2,9	-21,0
	+24,5	+108,4	-2,7
+ OX	+13,1	-0,4	-22,5
	+43,8	-56,0	-1,3

Таблица 3

Влияние железоредуцирующих и железooksисляющих микроорганизмов на подвижность фосфатов в почвах (мг/л) в зоне внесения по сравнению со всей массой почвы

Вариант	Почва		
	дерново-подзолистая №1	дерново-подзолистая №2	лугово-черноземная
KН <sub>2</sub> РO <sub>4</sub>	+14,1	+3,3	—
	+42,4	+3,1	—
+Red	+17,1	+33,2	+11,6
	+36,8	+16,1	+25,6
+OX	+3,0	+1,0	—
	+15,9	+6,4	+1,6

оокисляющих — снижается. Штамм *Clostridium pasteurianum* был эффективен через 14 дней после его внесения, что дает основание рекомендовать указанный прием для повышения подвижности фосфатов в

почвах, где преобладают трехзамещенные фосфаты окисного железа. Таким образом, внесение фосфатов по сравнению с контролем привело к уменьшению содержания в почве подвижных форм соединений Са, Mg, Fe и Mn и увеличению концентрации водорастворимых и кислоторастворимых фосфатов. При этом отношение водорастворимых и кислоторастворимых форм (Са + Mg) : (Fe + Mn) сузилось (табл. 3). Дополнительное внесение в почву железоредуцирующих микроорганизмов по сравнению с применением KН<sub>2</sub>РO<sub>4</sub> вызвало некоторое увеличение содержания водорастворимых и кислоторастворимых форм соединений Fe и Mn, а также значительное повышение содержания подвижных фосфатов.

Положительное действие железоредуцирующих бактерий на подвижность соединений Fe в наибольшей степени может проявляться в кар-

Таблица 4

Влияние железоредуцирующих бактерий на подвижность Fe в почвах (мг/100 г)

Почва и горизонт	Контроль		Контроль + солома		Контроль + солома + микроорганизмы	
	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Серозем:						
A <sub>1</sub>	0,40	0,91	0,09	2,88	0,07	4,59
A <sub>1</sub> '	0,08	2,87	0,07	4,84	0,09	5,59
B <sub>1</sub>	0,08	0,10	0,07	0,47	0,07	4,26
B <sub>1</sub> '	0,14	0,45	0,08	0,48	0,07	1,89
Пойменная:						
A	0,69	1,27	0,17	5,22	0,09	7,77
B	0,50	0,58	0,09	3,19	0,10	4,48
C	0,21	0,17	0,12	1,30	0,09	5,21
D	0,90	0,73	0,13	4,45	0,13	7,43
Бурая пустынная:						
A	0,32	0,28	0,19	1,60	0,13	5,26
B	0,07	4,91	0,08	5,76	0,09	6,29
C	0,08	2,67	0,10	3,46	0,10	4,30
D	0,06	2,05	0,19	3,78	0,16	7,82
Солончак:						
A	0,20	2,51	0,13	8,04	0,15	8,30
B	1,59	1,75	0,69	6,65	0,27	10,15
C	0,27	0,15	0,08	2,53	0,09	3,31
D	0,07	3,75	0,09	6,02	0,08	6,34

бонатных почвах, где в связи с образованием  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ощущается недостаток Fe и развивается хлороз растений.

Изменение подвижности Fe под влиянием органических остатков и железоредуцирующих микроорганизмов исследовалось на почвах Индии. При добавлении к почве соломы и соломы совместно с железоредуцирующими бактериями содержание водорастворимых соединений Fe не увеличилось, но резко возросло содержание кислоторастворимых соединений этого элемента (табл. 4). Под влиянием соломы и микроорганизмов существенно изменилось значение Eh среды. Так, средняя арифметическая величина Eh в контроле равна  $393,5 \pm 11,0$  мВ, в вариантах с соломой —  $212,7 \pm 23,0$ , соломой и железоредуцирующими микроорганизмами —  $170,4 \pm 27,0$  мВ. Таким образом, при внесении в почву микроорганизмов Eh выше, чем в варианте с добавлением одной соломы, однако содержание кислоторастворимых соединений Fe значительно выше. Полученные данные свидетельствуют о том, что влияние железобактерий на подвижность Fe, возможно, обусловлено их комплексообразующей способностью, железоокисляющих

и железовосстанавливающих микроорганизмов — уменьшением Eh среды и восстановлением  $\text{Fe}^{3+}$  до  $\text{Fe}^{2+}$  под действием железоредуцирующих бактерий, увеличением Eh среды и окислением  $\text{Fe}^{2+}$  в  $\text{Fe}^{3+}$  под действием железоокисляющих бактерий, комплексообразующей способностью железобактерий. Для оценки влияния этих факторов на подвижность Fe была изучена комплексообразующая способность отдельных штаммов (табл. 5).

Железоокисляющие и железовосстанавливающие микроорганизмы вызывали увеличение pH среды. Значение Eh возрастало по мере повышения концентрации микроорганизмов и продолжительности реакции. Содержание водорастворимого Fe при добавлении железовосстанавливающих микроорганизмов оставалось без изменений или возрастало. Отдельные штаммы железоокисляющих микроорганизмов оказывали неоднозначное действие на растворимость  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : одни штаммы увеличивали содержание Fe в растворе, другие — уменьшали. Среди исследуемых 12 штаммов выделялся штамм № 1, добавление которого в раствор приводило к снижению значений Eh и значительному увеличению концентрации Fe

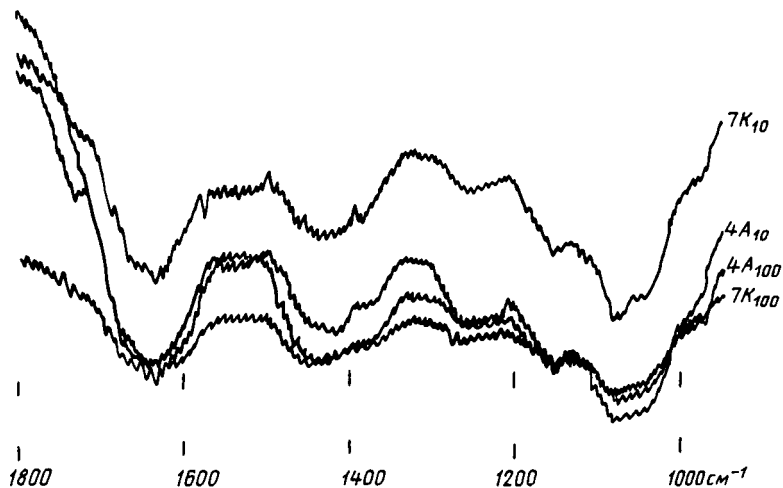
Таблица 5

Комплексообразующая способность железоокисляющих и железовосстанавливающих бактерий

Бактерии	$10^4$ клеток/мл			$10^6$ клеток/мл		
	pH	Eh, мВ по хлорсеребряному электроду	Fe, мг/л	pH	Eh, мВ по хлорсеребряному электроду	Fe, мг/л
OX	4,8	342	0,24	4,9	368	0,30
		364			401	
Red	4,8	341	0,32	4,8	368	0,26
		370			414	
Контроль	4,6	363	0,26	4,6	363	0,26

Примечание. Числитель — Eh через 6 сут, знаменатель — через 7 сут.

**И-спектры биомассы чистых культур железоокисляющих микроорганизмов.**  
7K<sub>10</sub> и 7K<sub>100</sub> — штамм 7К, концентрация Fe в среде 10 и 100 мг/л.



в растворе. Возможная комплексобразующая способность микроорганизмов подтверждалась и инфракрасными спектрами их препаратов. ИК-спектры биомассы чистых культур железоокисляющих микроорганизмов для исследуемых штаммов были различные (рисунок). Так, для штамма 7К по сравнению со штаммом 4А наблюдалась меньшая интенсивность пика, обусловленная наличием карбоксильных группировок в области  $1640\text{ см}^{-1}$ . При увеличении содержания Fe в питательном растворе с 10 до 100 мг/л интенсивность полос ИК-спектров изменялась в зависимости от наличия карбоксильных, спиртовых и фенольных группировок.

### Выводы

1. При внесении в почву железоредуцирующих микроорганизмов соотношение подвижных форм ( $\text{Ca} + \text{Mg}$ ): ( $\text{Fe} + \text{Mn}$ ) сужалось, а подвижность фосфатов увеличивалась. Внесение в почву железоокисляющих микроорганизмов вызывало

снижение подвижности фосфатов.

2. Внесение железоредуцирующих микроорганизмов совместно с соломой в карбонатные почвы способствовало значительному увеличению содержания кислоторастворимых соединений Fe и снижению Eh.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кауричев И. С., Орлов Д. С. Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и плодородии почв.— М.: Колос, 1982.— 2. Савич В. И., Наумова Л. М., Муради Н. М. Прогнозирование превращения фосфатов в дерново-подзолистой почве по состоянию катионов Ca, Fe и Al.— Изв. ТСХА, 1987, вып. 7, с. 85—92.— 3. Савич В. И., Трубицина Е. В., Муради Н. М. и др. Комплексообразующая способность компонентов почвенного раствора и органического вещества почв.— Изв. ТСХА, 1988, вып. 1, с. 73—80.— 4. Сидоренко О. Д., Савич В. И., Сидибег Г. Окислительно-восстановительное состояние и микробиологическая активность лугово-черноземной почвы при бессменном выращивании риса.— Изв. ТСХА, 1986,

вып. 4, с. 68—72.— 5. Термодинамические методы химической характеристики почв. Итоги науки и техники.— Почвоведение и агрохимия, т. 6. ВИНТИ, 1986, с. 188.— 6. *Tenner E. Z.*,

*Шильникова В. К., Переверзева Г. И.* Практикум по микробиологии.— М.: Агропромиздат, 1987.

*Статья поступила 19 марта 1989 г.*

### SUMMARY

The effect of anaerobic microorganisms on Fe and Mn mobility in the soil, relation of mobile forms (Ca+Mg): (Fe+Mn), the amount of water-soluble and acid-soluble phosphates was studied. It is suggested to apply feruum-reducing microorganisms together with straw under farm crops grown on carbonate soils.