

## ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ПОЧВА-РАСТЕНИЕ

В.И. САВИЧ<sup>1</sup>, С.Н. СМАРЫГИН<sup>1</sup>, В.В. ГУКАЛОВ<sup>2</sup>, В.А. РАСКАТОВ<sup>1</sup>, А.М. ПОЛЯКОВ<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,

<sup>2</sup>Северо-Кубанская сельскохозяйственная опытная станция)

*В статье рассмотрены вопросы оценки окислительно-восстановительных свойств почв системой методов титрования окислителями и восстановителями, потенциостатической кулонометрии на электродах из почвенно-угольной пасты. Дополнительную оценку окислительно-восстановительного состояния почв дает определение антирадикальной активности почвенных растворов и содержания в них антиоксидантов, углекислого газа и кислорода; содержания в почве положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений катионов, аэроионов; оценка энергетического состояния почв с использованием метода газоразрядной визуализации.*

*Показано увеличение количества восстановленных веществ при избыточном увлажнении почв и с повышением степени гумусированности. Показана целесообразность оценки окислительно-восстановительной буферной емкости почв. Предлагается ее математическое описание с использованием 15 уравнений парной корреляции. В интервале рН от 3 до 10 величина  $\Delta E_h/\Delta pH$  составляла в дерново-подзолистой почве – 62,2; в серой лесной почве – 43,9.*

*Проведенными исследованиями показана необходимость для характеристики окислительно-восстановительного состояния почв оценивать  $E_h$  в прикорневой зоне растений. Показано, что растения, приспособленные к условиям анаэробнозиса, в большей степени регулируют  $E_h$  в прикорневой зоне и селективность поглощения отдельных элементов.*

*Установлено, что для оптимизации свойств почв и системы почва-растение целесообразно совместное регулирование  $E_h$  почв, инактивация токсикантов, появляющихся при анаэробнозисе, введение в растения микроэлементов, являющихся составной частью окислительно-восстановительных ферментов растений.*

*Доказывается, что для наиболее полной оценки окислительно-восстановительного состояния почв необходима совместная интерпретация окислительно-восстановительных свойств, процессов и режимов при разработке моделей оптимального окислительно-восстановительного состояния почв для выполнения ими различных экологических функций.*

**Ключевые слова:** окислительно-восстановительное состояние, почва, растение, регулирование, буферная емкость.

### Введение

Оценка окислительно-восстановительного состояния в системе почва-растение имеет большое агроэкологическое значение. В литературе принято определение  $E_h$ ,  $gH_2$  и параметров почв, с ними взаимосвязанных [1, 10]. Ряд авторов предлагает оценивать дополнительно не только окислительно-восстановительные свойства, но также ОВ процессы и режимы [1, 5, 8].

С нашей точки зрения, для полной оценки окислительно-восстановительных свойств почв необходимо определение фракционного состава окислительно-восстановительных систем методами титрования окислителями и восстановителями, методом потенциостатической кулонометрии на электродах из почвенно-угольной пасты.

Дополнительную оценку окислительно-восстановительного состояния почв дает определение антирадикальной активности почвенных растворов и содержания

в них антиоксидантов, углекислого газа и кислорода; содержания в почве положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений катионов, аэроионов; оценка энергетического состояния почв с использованием метода газоразрядной визуализации.

Важное практическое значение имеет оценка изменения свойств почв на единицу изменения Eh и рН. Это позволяет рассчитывать пути оптимизации обстановки и способы повышения плодородия почв.

Для оптимизации свойств почв и системы почва-растение целесообразно совместное регулирование Eh почв, инактивация токсикантов, появляющихся при анаэробном разложении, введение в растения микроэлементов, являющихся составной частью окислительно-восстановительных ферментов растений.

Это подтверждают полученные нами экспериментальные материалы.

### **Методика исследования**

Объектом исследования выбраны дерново-подзолистые, серые лесные, каштановые почвы, черноземы [2, 3, 10].

Исследовались дерново-подзолистые среднесуглинистые почвы Московской области хозяйства «Михайловское», опыт кафедры растениеводства МСХА, развитые на покровных суглинках – слабоокультуренные и хорошо окультуренные с внесением удобрений из расчета использования растениями 3% ФАР. При этом рН(КС1) данных почв соответственно 4,3 и 5,9; содержание гумуса – 1,4 и 2,2%, S – 10,9 и 17,0 мг-экв/100 г, подвижный фосфор по Кирсанову – 3,3 и 30,0 мг/100 г почв, обменный калий – 6,0 и 18,0 мг/100 г почв.

Образцы серой лесной почвы взяты из учхоза «Дружба» Ярославской области. Почва серая лесная среднесуглинистая на покровных отложениях. рН(КС1) – 5,5, S – 15,0 мг-экв/100 г, содержание гумуса – 3,1%.

Образцы тяжелосуглинистого выщелоченного чернозема взяты со стационара Всероссийского научно-исследовательского института садоводства им. И.В. Мичурина и имели содержание гумуса – 4,5%, рН(КС1) – 5,7, содержание подвижного фосфора – 25 мг/100 г, обменного калия – 30 мг/100 г.

Светло-каштановые почвы взяты в Кустанайской области Казахстана и характеризуются рН(вод) – 7,5–7,7, содержание гумуса – 1,9%, емкость поглощения – 9 мг-экв/100 г.

Методика исследования состояла в оценке агрохимических и физико-химических свойств почв общепринятыми методами [2, 7, 11], в оценке фракционного состава окислительно-восстановительных систем, буферной емкости почв в окислительно-восстановительном интервале методом потенциостатической кулонометрии, в определении положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений при статистической обработке полученных данных, в постановке модельных опытов по оценке изменения свойств почв в условиях избыточного увлажнения [2, 3, 4, 6, 7, 9].

### **Результаты и их обсуждение**

По полученным нами данным, окислительно-восстановительное состояние почв обусловлено окислительно-восстановительными свойствами почв, протекающими окислительно-восстановительными процессами и режимами – закономерным изменением свойств и процессов во времени и в пространстве.

1. Окислительно-восстановительные свойства характеризуются Eh, pe,  $\text{rH}_2$ , фракционным составом окислительно-восстановительных систем, окислительно-восстановительной емкостью почв.

По полученным нами данным, окислительно-восстановительная (ОВ) емкость почв, определенная методом потенциостатической кулонометрии на электродах из почвенно-угольной пасты, была выше в черноземно-луговой почве и ниже – в дерново-подзолистой почве. Это иллюстрируют данные таблицы 1.

Таблица 1

**Окислительно-восстановительная емкость почв,  
определенная методом потенциостатической кулонометрии  
на электродах из почвенно-угольной пасты в фоновом электролите КСl**

Почва	Количество соединений мг-экв/100 г почвы			
	восстанавливающихся при		окисляющихся при	
	-0,3 в	0,0 в	+0,7 в	+1,0 в
дерново-подзолистая	0,60	0,30	0,10	0,20
чернозем выщелоченный	1,10	0,50	0,20	0,70
черноземно-луговая	1,20	0,80	0,40	1,90

При этом окисление и восстановление происходило в отдельных типах почв с разной скоростью.

Так, соотношение компонентов почвенно-поглощающего комплекса (ППК), восстанавливающихся за время 5 минут и 30 минут в дерново-подзолистой почве при  $E_h = 200$  мв было 0,52, в черноземе – 0,68. Соотношение окисляющихся при +500 мв веществ за время 5 и 30 минут составляло в дерново-подзолистой почве 0,56, в черноземе – 0,50.

Содержание антиоксидантов (в мкг/г в пересчете на кверцетин) составляло в почвенных растворах дерново-подзолистой почвы разреза 2 оптимального увлажнения 2,88, а в почве избыточного увлажнения – 5,45; в почве разреза 3 – соответственно 0,09 и 8,04; в черноземе обыкновенном – 0,84 и 2,26; в лугово-черноземной почве – соответственно 2,74 и 6,09.

Антирадикальная активность (в мкг/г в пересчете на аскорбиновую кислоту) составляла в почвенных растворах чернозема выщелоченного оптимального увлажнения 2,05; избыточного увлажнения – 13,5; в почвенных растворах чернозема обыкновенного – соответственно 1,54 и 8,82; в лугово-черноземной деградированной почве – соответственно 2,2 и 2,9.

Фракционный состав окислительно-восстановительных систем почв хорошо идентифицируется и при титровании их окислителями и восстановителями. Это иллюстрируется данными таблицы 2. Как видно из представленных данных, при избыточной влажности почв увеличивается количество окисляемых веществ и уменьшается количество восстанавливаемых.

Важным параметром окислительно-восстановительного состояния почв является окислительно-восстановительная буферная емкость почв.

Изменение  $E_h$  почв при добавлении к почве окислителя или восстановителя

$P_{ов} = dOx/dE_h$ ;  $P_{ов} = dRed/dE_h$ , где  $Ox$  и  $Red$  – количество добавленных мг-экв/100 г окислителя и восстановителя.

Так, например, по полученным данным, при титровании дерново-подзолистых почв  $K_2Cr_2O_7$  (X):  $P_{ов} = 20,7 + 18,9X$ ;  $r = 0,99$ ; для светло-каштановой почвы:  $P_{ов} = 0,2 + 1,9X$ ;  $r = 0,99$ ; для каштановой почвы:  $P_{ов} = 2,9 + 4,7X$ ;  $r = 0,99$ .

**Фракционный состав ОВ систем чернозема,  
компостированного при различной степени увлажнения**

Фракции	Содержание фракций в % от суммы	
	чернозем сухой	чернозем при избыточной влажности
окисляемые $\text{KMnO}_4$ 0,5н в 1,0н $\text{H}_2\text{SO}_4$ при 60°	4,0	17,8
$\Sigma$	44,4	59,4
восстанавливаемые 1н $\text{SnCl}_2$ в 1,0н $\text{HCl}$ при 20°	43,6	30,3
$\Sigma$	55,6	40,6

Буферная емкость отличается в окислительном и восстановительном интервалах. Это иллюстрируют данные следующей таблицы.

Таблица 3

**Окислительно-восстановительная буферная емкость почв,  
компостированных 30 дней в условиях избыточного увлажнения**

Почва	Уравнение парной корреляции	R
светло-каштановая + $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	$\pi_{\text{ОВ}} = 0,2 + 1,9X$	0,99
светло-каштановая + $\text{SnCl}_2$	$\pi_{\text{ОВ}} = 2,6X^{1/2}$	0,99

\* X – количество добавленных  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  и  $\text{SnCl}_2$  мг-экв/100 г почв

Фракционный состав окислительно-восстановительных систем в почве определяет устойчивость почв к затоплению и развитию оглеения, к появлению в почвах токсичных соединений, обусловленных анаэробнозисом.

2. Окислительно-восстановительные процессы в почвах сопровождаются изменением практически всех свойств почв.

С изменением окислительно-восстановительного состояния почв меняется состояние и подвижность катионов и анионов в почве. По полученным данным, изменение  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  совпадает по времени с изменением Eh и опережает изменение  $\text{NO}_3/\text{NH}_4$ . С увеличением степени окисленности уменьшается отношение подвижных форм железа и марганца, т.к. соединения железа в почве переходят в восстановленное состояние (что значительно увеличивает их растворимость) при более низком значении потенциала, чем соединения марганца. При этом при избыточном увлажнении почв существенно увеличивается содержание подвижных соединений Fe, Mn, Al, что является одной из причин гибели растений в данных условиях. Увеличение при избыточном увлажнении почв содержания подвижного железа (определяемого методом химической автографии на основе электролиза) иллюстрируют данные следующей таблицы.

Полученные нами результаты говорят и о возможности передвижения ионов во влажных почвах ненарушенного состояния при напряжении всего 1,0–0,5 в, что может наблюдаться в естественных условиях.

Избыточное увлажнение почв приводит и к изменению соотношения подвижных катионов в почвах, что важно знать при корректировке системы удобрений на почвах разной степени гидроморфности и в зависимости от погодных условий. Это иллюстрируют данные следующей таблицы 5.

**Содержание подвижных соединений железа  
в дерново-подзолистой хорошо окультуренной почве, мкг/см**

Влажность	Напряжение 5 в, время 1 мин.		Напряжение 75 в, время 1 мин.		Напряжение 75 в, время 30 мин.	
	-	+	-	+	-	+
оптимальная	1,58±0,25	1,08±0,04	1,19±0,06	1,05±0,07	2,54±0,84	1,07±0,06
избыточная	2,06±0,09	2,08±0,09	2,17±0,08	2,35±0,11	2,21±0,08	2,47±0,08

Как видно из представленных данных, избыточное увлажнение почв приводит к увеличению подвижности железа и марганца и уменьшению подвижности кальция и магния. При этом увеличивается отношение подвижных Ca/Mg и Fe/Mn. В нижеприведенной таблице 6 приведены данные об изменении подвижности ионов при избыточном увлажнении исследуемых почв разной степени удобрённости.

Таблица 5

**Соотношение катионов в почвах, компостирувавшихся  
при оптимальном и избыточном увлажнении, n = 16, мг/л**

Почва	Вариант увлажнения	Ca/Mg	Fe/Mn
дерново-подзолистая, контроль	оптимальное	$\frac{131,6 \pm 23,3}{55,3 \pm 8,6} = 2,4$	$\frac{0,02}{8,56 \pm 3,1} = 0,002$
	избыточное	$\frac{36,2 \pm 3,3}{7,7 \pm 0,8} = 4,7$	$\frac{0,16 \pm 0,02}{10,40 \pm 1,3} = 0,01$
дерново-подзолистая хорошо окультуренная	оптимальное	$\frac{145,6 \pm 15,7}{65,6 \pm 3,1} = 2,2$	$\frac{0,02}{3,2 \pm 1,7} = 0,006$
	избыточное	$\frac{64,4 \pm 6,7}{22,8 \pm 1,7} = 2,8$	$\frac{0,11 \pm 0,01}{4,20 \pm 0,8} = 0,03$

Таблица 6

**Изменение состояния соединений ионов в дерново-подзолистых почвах  
при развитии анаэробнозиса (время – 10 дней), мг/л**

Почва	Увлажнение	pH	Eh мв по ХСЭ	Fe *	Mn *
ДП <sub>2</sub> ОК <sub>3</sub>	60% ПВ	7,4	146	3,0	21,9
	100% ПВ	8,6	115	5,8	25,1
ДП <sub>2</sub> ОК <sub>1</sub>	60% ПВ	6,1	120	9,2	24,6
	100% ПВ	7,5	100	15,3	26,3

\* ОК<sub>1</sub> – слабоокультуренная, ОК<sub>3</sub> – хорошо окультуренная

\* вытеснение мембраной МА-ЭДТА

Изменение Eh сопровождается изменением содержания в почве подвижных соединений, что имеет важное агрономическое значение (табл. 7).

3. Важное агрономическое значение имеет скорость изменения Eh при затоплении почв, величины  $\Delta Eh/\Delta pH$  в разных интервалах pH;  $\Delta Eh/\Delta t$ ;  $\Delta Eh/\Delta t^0$ . При этом, с практической точки зрения, необходимо знание  $\Delta X/\Delta Eh$ , где X – содержание подвижных соединений железа, алюминия, марганца, серы, азота, фосфатов и других элементов. Эти показатели меняются в сезонной динамике, что описывается петлей

гистерезиса. При этом степень разомкнутости петли характеризует нестационарность состояния почв и тренд их эволюции.

Таблица 7

### Изменение $pNO_3$ при избыточном увлажнении почв

Почва	Увлажнение	$pNO_3 = -lgNO_3$ , моль/л	
		начальная	через 6 дней
дерново-подзолистая	оптимальное	2,3	2,3
	избыточное	2,5	2,5
чернозем	оптимальное	1,7	1,7
	избыточное	2,9	4,8

Как известно, с повышением pH величина Eh уменьшается. Однако эта зависимость является характерной для отдельных почв. В интервале pH от 3 до 10 величина  $\Delta Eh/\Delta pH$  составляла в дерново-подзолистой – 65,2; в серой лесной – 43,9; в черноземе – 48,0. Однако эти показатели отличались и для почв одного типа, но разного гранулометрического и минералогического состава. Так, для серой лесной почвы учхоза «Дружба»  $Eh = 540,1-40,9pH$ ;  $r = -0,99$ ; для серой лесной почвы Каширского стационара  $Eh = 622,5-52,4pH$ ;  $r = -0,98$ .

Как видно из представленных данных, величина  $\Delta Eh/\Delta pH$  неодинакова в разных типах почв и для отдельных типов почв отличается в различных интервалах pH. Полученные данные свидетельствуют об условности вычисления общепринятых показателей напряженности окислительно-восстановительных процессов в почвах:  $rH_2 = Eh/30 + 2pH$ .

Более правильно, с нашей точки зрения, вычислять Eh на стандартное значение pH:  $Eh_{(pH=6,5)} = Eh_1 - \Delta Eh/\Delta pH$ , где  $\Delta pH = pH_1 - pH_{6,5}$  при  $pH_1$  в исходной почве.

С агрономической точки зрения это необходимо учитывать при прогнозе изменения Eh и подвижности Fe, Mn, Cu, Cr при известковании.

4. С агрономической точки зрения важное значение имеет скорость изменения Eh при затоплении. Это определяет и скорость появления в почве токсичных соединений  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $H_2S$  и т.д. Эта величина также является характерной для отдельных типов почв, что иллюстрируется данными следующей таблицы.

Таблица 8

### Скорость изменения Eh при затоплении почв

Почва	$\Delta Eh/\Delta t$	Eh мв по ХСЭ через 45 дней
чернозем типичный	-13,8	95
чернозем выщелоченный	-17,2	-82

5. В почвах присутствуют зоны окисления и восстановления, представленные как внешними и внутренними слоями структурных отдельностей, так и микроразонами органических и минеральных удобрений, ходами корней, затеками в почвенном профиле гумуса, кремнезема и т.д. Очевидно, что от зон окисления и восстановления протекающие там процессы будут распространяться по вертикали и горизонтали.

Проведенные исследования показали наличие в почвах фронта распространения окисления, восстановления. Пример этого явления при внесении в почву  $KMnO_4$  приведен в следующей таблице (1 ряд – зона внесения окислителя, 2, 3 ряды – на разном удалении от зоны внесения окислителя).

Таблица 9

**Волновое распространение окисления в исследуемых почвах (n = 8)**

Почва	Увлажнение	Ряд	Eh мв по ХСЭ
дерново-подзолистая хорошо окультуренная	оптимальное	1	355,0±54,2
		2	276,2±33,7
		3	256,2±30,2
– « -	избыточное	1	260,0±15,3
		2	232,5±18,6
		3	147,5±15,8

Как видно из представленных данных, окислительно-восстановительный потенциал выше при оптимальном увлажнении почв. Его величина уменьшается с удалением от зоны внесения окислителя. Почвы избыточного увлажнения имеют большую буферность к окислению, поэтому в них величины Eh ниже.

6. Окислительно-восстановительное состояние почв отличается в почвенных растворах и в поверхностных водах, в основной массе почвы и в прикорневой зоне растений. Это иллюстрируют данные следующей таблицы.

Таблица 10

**Изменение Eh при компостировании почв  
в условиях избыточной влажности (Eh мв по ХСЭ, время – 14 дней)**

Почва	В воде	1–3 см от поверхности	Около дна	ΔEh, мв
дерново-подзолистая хорошо окультуренная	195	285	–235	430
слабо окультуренная	88	135	–135	223
хорошо окультуренная с высокой дозой удобрений	90	–115	–195	285

Как видно из представленных данных, окислительно-восстановительный потенциал в воде значительно выше, чем в слое почвы на глубине 1–3 см от поверхности и особенно в слое почвы около дна сосуда. Глубина проникновения в почву окисления, как и скорость распространения потенциала, неодинаковы в различных почвах и определяются окислительно-восстановительной буферной емкостью. На хорошо окультуренной почве в связи с большой гумусированностью и микробиологической активностью больше расход кислорода при затоплении почв и соответственно отмечается более низкая величина Eh на дне сосуда (что будет наблюдаться в нижних горизонтах почв). Влияние дозы минеральных удобрений на ОВП зависит от формы удобрений или окисленных  $\text{NO}_3$ , или восстановленных  $\text{NH}_4$  и от pH (при подкислении почв за счет физиологически кислых удобрений –  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  или подщелачивания почв за счет физиологически щелочных удобрений –  $\text{NaNO}_3$ ).

Окислительно-восстановительное состояние почв изменяется в прикорневой зоне растений. Растения в определенной степени адаптируются к восстановительным условиям, подкисляя почву в прикорневой зоне, выделяя в нее кислород, осажая железо, марганец, алюминий в прикорневом чехле и внутри стебля в аэренхиме [1, 7]. Так, по полученным нами данным, Eh раствора дерново-подзолистой почвы, контактирующего с корнями растений в течение 5 дней, составляет у картофеля 50 мв, а у таволги, приспособленной к анаэробнозису 153 мв. Растения, приспособленные к анаэробнозису, имели большую долю отрицательного заряда на корнях



и поглощали больше  $K^+$ , по сравнению с  $NO_3^-$ . Отношение  $K/NO_3$ , ммоль/100 г корней составляло для картофеля 0,27; а для таволги 0,52. При этом в прикорневой зоне растений при избыточном увлажнении изменялось отношение положительно и отрицательно заряженных соединений, определенных методом химической автографии на основе электролиза [4]. Так, под таволгой в дерново-подзолистой почве отношение положительно заряженных комплексов Fe/Mn при оптимальной влажности было 14,1; при избыточной – 21,6. Отношение отрицательно заряженных соединений соответственно 1,4 и 0,2. Под картофелем отношение Fe/Mn положительно заряженных комплексов было при оптимальном увлажнении 14,3; при избыточном – 30,0. Отношение отрицательно заряженных соединений соответственно 0,6 и 0,1.

Избыточное увлажнение почв приводит к угнетению большинства сельскохозяйственных культур. Это определяет величину риска падения урожая при неблагоприятных погодных условиях. По полученным нами данным [9], этот показатель больше на почвах слабокультуренных, по сравнению с хорошо окультуренными, и больше для картофеля, озимой пшеницы, по сравнению с многолетними травами. Так, для дерново-подзолистых почв Московской области риск уменьшения отчуждения фитомассы пшеницы с поля (млн ккал/га) при избыточном увлажнении для слабокультуренной почвы составлял 99%, для хорошо окультуренной – 97,4%, для трав 2-го года пользования соответственно 76,6 и 67,4%.

Риск уменьшения поступления энергии в почву с пожнивными остатками пшеницы составлял для слабокультуренной почвы 92,2%, для хорошо окультуренной с внесением удобрений – 94,3%; для многолетних трав 2-го года соответственно 51,6 и 39,6%.

7. Избыточное увлажнение почв влияет и на процессы метаболизма в растениях, развивающихся на оглеенных почвах. Это иллюстрируют данные следующей таблицы.

Таблица 11

**Содержание катионов в продуктах транспирации из листьев яблонь, развивающихся на дерново-подзолистых почвах разной степени гидроморфности, мг/л**

Состояние растений и почв	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	K
хорошее состояние на автоморфной почве;	20,1	31,1	0,4	0,04	0,05	15,1
гибнущее дерево на оглеенной почве	11,0	36,7	0,8	0,08	0,92	27,6

Как видно из представленных данных, в продуктах транспирации из листьев яблонь, развивающихся на оглеенной почве, меньше Ca, но значительно больше Fe, Mn, K.

При поступлении элементов в растения протекают процессы конкурирующего комплексообразования аддендов и лигандов, процессов метаболизма поступающих в корень соединений. Очевидно, существуют и процессы конкурирующего окисления и восстановления.

8. В выполненных работах показана целесообразность регулирования окислительно-восстановительных процессов в системе почва-растение, целесообразность оценки оксидантов и антиоксидантов, антирадикальной активности, содержания аэроионов, содержания  $CO_2$  в межклетниках [9].

Проведенные исследования подтвердили полученные ранее результаты, доказывающие, что повышение Eh в микроразонах и улучшение развития растений при оглеении может быть достигнуто внесением в почву регуляторов ОВ состояния. Это иллюстрируют данные следующей таблицы.



**Влияние регуляторов ОВ состояния на Eh почв и развитие растений**

Вариант	Eh, мв по ХСЭ	Масса растений	Корни
серая лесная почва			
контроль	160	4,4	27,3 мм
+ Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 15 мг/100 г	215	6,6	181,0 мм
чернозем			
контроль	-125	1,37	0,47 г
+ 2 г KNO <sub>3</sub>	189	2,54	1,16 г

Как видно из представленных данных, внесение в почву Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> и KNO<sub>3</sub> повысило окислительно-восстановительный потенциал избыточно увлажненных почв, массу корней и их размер. При внесении в почву KNO<sub>3</sub> увеличивается и активность NO<sub>3</sub> в почвах (табл. 13). Увеличение Eh при внесении в почву окислителя больше при увеличении дозы регуляторов. Подкисление почв также приводит к некоторому увеличению Eh, что соответствует теоретическим закономерностям.

**Влияние внесения в почву KNO<sub>3</sub> на Eh почв и рNO<sub>3</sub> на 14 день затопления**

Определяемые параметры	Дерново-подзолистые почвы разной степени окультуренности и чернозем			
	OK <sub>3</sub>	OK <sub>1</sub>	OK <sub>2</sub>	чернозем
Eh мв по ХСЭ, контроль	-235	-135	-180	-105
+ KNO <sub>3</sub>	105	125	130	170
pNO <sub>3</sub> , контроль	4,0	4,0	4,0	3,0
+ KNO <sub>3</sub>	2,0	2,0	1,0	2,0
вес стеблей, контроль	1,1	1,1	0,5	0,9
+ KNO <sub>3</sub>	3,1	0,9	1,2	1,4

\* OK<sub>3</sub> – хорошо окультуренная, OK<sub>1</sub> – слабоокультуренная, OK<sub>2</sub> – среднеокультуренная

**Выводы**

1. Проведенные экспериментальные исследования показали, что для полной оценки окислительно-восстановительных свойств почв необходимо определение фракционного состава окислительно-восстановительных систем методами титрования окислителями и восстановителями, методом потенциостатической кулонометрии на электродах из почвенно-угольной пасты.

Дополнительную оценку окислительно-восстановительного состояния почв дает определение антирадикальной активности почвенных растворов и содержания в них антиоксидантов, углекислого газа и кислорода; содержания в почве положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений катионов, аэроионов.

2. Количество соединений почв, восстанавливающихся при использовании потенциостатической кулонометрии при Eh = -0,3 в, составляло в дерново-подзолистой почве 0,6 мг-экв/100 г, в перегнойно-торфяной – 6,8; окисляющихся при Eh = +1,0 в соответственно 0,20 и 260 мг-экв/100 г. Количество антиоксидантов в мкг/г в пересчете на кверцетин составляло в почвенном растворе дерново-подзолистой почвы оптимального увлажнения 2,9, а в почве избыточного увлажнения – 5,5.

3. Предлагается определение фракционного состава окислительно-восстановительных систем при титровании суспензий почв окислителями и восстановителями с разной величиной окислительно-восстановительного потенциала, при определенных концентрациях и определенной температуре титранта.

4. Показана информативность величин  $\Delta E_h/\Delta pH$ , которые отличаются для разных почв и в отдельных интервалах pH. Это еще раз свидетельствует об условности оценки напряженности окислительно-восстановительных процессов в почве по величине  $gH_2$ .

Важное практическое значение имеет оценка изменения свойств почв на единицу изменения Eh и pH. Это позволяет рассчитывать пути оптимизации обстановки и способы повышения плодородия почв.

В интервале pH от 3 до 10 величина  $\Delta E_h/\Delta pH$  составляла в дерново-подзолистой почве – 62,2, в серой лесной почве – 43,9, в красnozеме – 78,1.

При компостировании почв в условиях избыточного увлажнения содержание водорастворимого железа возросло с 9,2 до 15,3 мг/л,  $pH(H_2O)$  – с 6.1 до 7,5,  $pNO_3$  – с 2,3 до 2,5.

5. Анаэробные условия, возникающие в почвах, тесно связаны и с процессами метаболизма растений.

По полученным данным, Eh раствора дерново-подзолистой почвы, контактирующей с корнями картофеля, составлял +50 мВ, а с корнями таволги достигал величины +153 мВ. В продуктах транспирации листьев яблони, развивающейся на дерново-подзолистой почве нормального и избыточного увлажнения, содержание Са составляло соответственно 20,1 и 11,0 мг/л, Fe – 0,4 и 0,8; Mn – 0,04 и 0,08; K – 15,1 и 27,6 мг/л.

6. Установлено, что для оптимизации свойств почв и системы почва-растение целесообразно совместное регулирование Eh почв; инактивация токсикантов, появляющихся при анаэробии; введение в растения микроэлементов, являющихся составной частью окислительно-восстановительных ферментов в растениях.

### Библиографический список

1. *Кауричев И.С., Орлов Д.С.* Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и плодородии почв // М., Колос, 1982, 272 с.

2. *Савич В.И., Улько Н.Г., Яковлева Н.Н.* Определение окислительно-восстановительного состояния почв методом потенциостатической кулонометрии на электродах из почвенно-угольной пасты, Почвоведение, 1979, № 4, с. 157–166

3. *Савич В.И., Смарицын С.Н.* Определение буферной емкости почв в окислительно-восстановительном интервале методом потенциостатической кулонометрии, Изв. ТСХА, 1979, вып. 4, с. 194–196

4. *Савич В.И., Раскатов В.А.* Инструментальные методы исследования почв как компонентов агрофитоценозов и экологической системы. Учебное пособие / Савич В.И.; Раскатов В.А. – Москва: Издательство РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2012. – 229 с.

5. *Савич В.И., Саидов А.К., Раскатов В.А. Норовсурэн Ж., Снагинский В.Е.* Геофизические поля как фактор почвообразования // Изв.ТСХА, Вып. 3, 2009, с. 9–23

6. *Савич В.И., Савич Л.В., Вишняков Ю.М.* Оценка предельно допустимой концентрации свинца по активности фотосинтеза // Докл. АН РФ. Общая биология, 1993, т. 333, № 2, с. 121–122

7. *Савич В.И., Кауричев И.С., Шишов Л.Л.* Агрономическая оценка окислительно-восстановительного состояния почв // Почвоведение, 2004, № 6, с. 702–712

8. Савич В.И., Мазиров М.А., Седых В.А. Агроэкологическая оценка геофизических полей // РГАУ-МСХА, ВНИИА, 2016, 492 с.

9. Савич В.И., Мазиров М.А., Борисов Б.А. Оценка оптимальных свойств почв и недостатка элементов питания для растений с использованием методов на основе принципов обратной связи, Международный с.-х. ж-л, 2017, № 4, с. 48–50

10. Шатилов И.С., Замараев А.Г., Савич В.И. Энергомассообмен в звене полевого севооборота, ч. 1 // М., Агроконсалт, 2004, 368 с.

11. Jan Glinshi Zofia Stepniewska, Witold Stepniewski, Artur Banach oxidation – reduction properties of soils, Lublin, 2012, 128 p.

## INTEGRAL ESTIMATION OF OXIDATION-REDUCTION (REDOX) STATUS OF THE “SOIL-PLANT” SYSTEM

V.I. SAVICH<sup>1</sup>, S.N. SMARYGIN<sup>1</sup>, V.V. GUKALOV<sup>2</sup>, V.A. RASKATOV<sup>1</sup>, A.M. POLYAKOV<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, <sup>2</sup>North-Caucasian Agricultural Experimental Station)

*The paper considers some issues relating to the evaluation of oxidation-reduction (redox) properties of soils using a system of titration methods with oxidizers and reducing agents, and controlled-potential coulometry on electrodes from a soil-coal paste. The redox status of soils can be additionally evaluated using the gas-discharge imaging method through determining the anti-radical activity of soil solutions and the content of antioxidants, carbon dioxide and oxygen, as well as positively and negatively charged complex compounds of cations, air ions in the soil, and the energy status of soils.*

*It is shown that the amount of reduced substances increases in case of abundant soil moisture and increased humus content. The authors prove the reasonability of estimating the redox buffer capacity of soils and offer its mathematical description using 15 equations of pair correlation. In the pH range from 3 to 10, the value of  $\Delta Eh / \Delta pH$  has amounted to 62.2 in the sod-podzolic soil and 43.9 in gray forest soil.*

*Studies have proved the need to determine the Eh value in the root zone of plants in order to evaluate the redox status of soils. It is shown that plants adapted to the anaerobiosis conditions are highly prone to regulate Eh in the root zone and the absorption selectivity of individual elements.*

*It has been found that to optimize the properties of soils and the “soil-plant” system, it is advisable to take the following joint measures: regulate the Eh factor of soils, inactivate the toxicants that appear in anaerobiosis, and introduce into the plants microelements that are an integral part of the redox enzymes of plants.*

*It is proved that the most complete evaluation of the redox status of soils requires integral interpretation of redox properties, processes and modes to develop models of an optimal redox status of soils necessary to perform various ecological functions.*

**Keywords:** oxidation-reduction (redox) status, soil, plant, regulation, buffer capacity.

## References

1. Kaurichev I.S., Orlov D.S. Okislitel'no-vosstanovitel'nyye protsessy i ikh rol' v genezise i plodorodii pochv [Redox processes and their role in soil genesis and fertility] // М., Kolos, 1982: 272. (In Rus.)

2. Savich V.I., Ul'ko N.G., Yakovleva N.N. Opredeleniye okislitel'no-vosstanovitel'nogo sostoyaniya pochv metodom potentsiostaticheskoy kulonometrii na elektrodakh iz

pochvenno-ugol'noy pasty [Determination of the redox state of soils using the method of controlled-potential coulometry at the electrodes of soil-coal paste] // Pochvovedeniye, 1979; no.4: 157–166. (In Rus.)

3. *Savich V.I., Smarygin S.N.* Opreddeniye bufernoy yemkosti pochv v okislitel'no-vosstanovitel'nom intervale metodom potentsiostaticheskoy kulonometrii [Determination of soil buffer capacity in the redox interval using the method of controlled-potential coulometry] // Izv. TSKHA, 1979, issye 4: 194–196. (In Rus.)

4. *Savich V.I., Raskatov V.A.* Instrumental'nyye metody issledovaniya pochv kak komponentov agrofytotsenozov i ekologicheskoy sistemy [Instrumental methods for the study of soils as components of agrophytocenosis and ecological systems]. Study manual / Savich V.I.; Raskatov V.A. – Moskva: Izdatel'stvo RGAU-MSKHA imeni K.A. Timiryazeva, 2012: 229. (In Rus.)

5. *Savich V.I., Saidov A.K., Raskatov V.A. Norovsuren Zh., Snaginskiy V.Ye.* Geofizicheskiye polya kak faktor pochvoobrazovaniya [Geophysical fields as a factor of soil formation] // Izv. of TAA, issue 3, 2009: 9–23. (In Rus.)

6. *Savich V.I., Savich L.V., Vishnyakov Yu.M.* Otsenka predel'no dopustimoy kontsentratsii svintsa po aktivnosti fotosinteza [Determination of the maximum allowable concentration of lead based on photosynthesis activity] // Dokl. AN RF. Obshchaya biologiya, 1993, vol. 333, no.2: 121–122. (In Rus.)

7. *Savich V.I., Kaurichev I.S., Shishov L.L.* Agronomicheskaya otsenka okislitel'no-vosstanovitel'nogo sostoyaniya pochv [Agronomical evaluation of the soil redox status] // Pochvovedeniye, 2004, no.6: 702–712. (In Rus.)

8. *Savich V.I., Mazirov M.A., Sedikh V.A.* Agroekologicheskaya otsenka geofizicheskikh poley [Agroecological evaluation of geophysical fields] // RGAU-MSKHA, VNIIA, 2016: 492. (In Rus.)

9. *Savich V.I., Mazirov M.A., Borisov B.A.* Otsenka optimal'nykh svoystv pochv i nedostatka elementov pitaniya dlya rasteniy s ispol'zovaniyem metodov na osnove printsipov obratnoy svyazi [Evaluation of optimal soil properties and lack of nutrients for plants using methods based on the feedback principles] // Mezhdunarodnyy s.-kh. zh-l, 2017, no.4: 48–50 (In Rus.)

10. *Shatilov I.S., Zamarayev A.G., Savich V.I.* Energomassobmen v zvene polevogo sevooborota [Energy mass transfer in the link of field crop rotation], part 1 // M., Agrokon-salt, 2004: 368. (In Rus.)

11. *Jan Glinshi Zofia Stepniewska, Witold Stepniewski, Artur Banach* oxidation – reduction properties of soils, Lublin, 2012: 128. (In English)

**Савич Виталий Игоревич** – д.с.-х.н., профессор, кафедра почвоведения, геологии и ландшафтоведения, Российский государственный аграрный университет -МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550 Москва ул. Тимирязевская, д.49. Тел. 905-501-14-46, E-mail: savich.mail@gmail.com.

**Смарыгин Сергей Николаевич** – к.х.н., профессор, кафедра химии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

**Гукалов Виктор Владимирович** – кандидат с. – х. наук, директор Северо-Кубанской сельскохозяйственной опытной станции.

**Раскатов Вячеслав Андреевич** – к.б.н, доц. кафедры экологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: +7(926) 571-01-09 e-mail: raskatovv@list.ru).

**Поляков Алексей Михайлович** – ассистент кафедры почвоведения, геологии и ландшафтоведения РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева.

**Vitaliy I. Savich** – DSc (Ag), Professor, the Department of Soil Science, Geology and Landscape Study, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49, phone: 8(499) 976-08-97 e-mail: savich.mail@gmail.com.

**Sergey N. Smarygin** – PhD (Chem), Professor, the Department of Chemistry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49)

**Viktor V. Gukalov** – PhD (Ag), Deirector of North-Caucasian Agricultural Experimental Station.

**Vyacheslav A. Raskatov** –PhD (Bio), Associate Professor, the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49, phone: +7 (926) 571-01-09; e-mail: raskatovv@list.ru).

**Aleksei M. Polyakov**, Assistant Professor, the Department of Soil Science, Geology and Landscape Study, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49)