

## ХАРАКТЕРИСТИКА ОГЛЕЕНИЯ ПО СОСТОЯНИЮ Fe В ПОЧВАХ

*Ю. Н. Водяницкий*

Почвенный институт им. В.В. Докучаева

Несмотря на длительные исследования почвенного железа (Водяницкий, 2003; Зонн, 1982; Schwertmann, 1988), многие моменты остаются неизученными. Это относится к вопросам методического характера, которые имеют приоритетное значение, так как ошибки, существующие в методиках, множатся, когда методики бездумно применяются к анализу различных почв. В настоящей статье приводится анализ методик Тамма и Мера–Джексона на примере лесных почв Предуралья.

Интерпретация этих двух форм соединений железа, начиная с работ Зонна (1982), находится под влиянием парадигмы об аддитивности вытяжек: считается, что более слабый экстрагент – реактив Тамма – растворяет аморфные и слабоокристаллизованные соединения, составляющих часть от всех свободных, дитиониторастворимых соединений Fe дит, т. е. Fe окс – это часть Fe дит. На основе этой парадигмы рассматривается и критерий Швертмана (Schwertmann, 1988):  $K_{III} = (Fe \text{ окс} : Fe \text{ дит}) < 1$ , который используют для характеристики оглеения почв. Но имеется масса данных о фактическом нарушении принципа аддитивности вытяжек. С одной стороны, доказано катализирующее действие Fe(II) в составе таких минералов, как сидерит  $FeCO_3$  на растворимость Fe(III)-(гидр)оксидов (Водяницкий, 2001, 2003); это может привести к такому сильному нарушению аддитивности, что  $K_{III} > 1$ . С другой стороны, возможно проявление артефакта – новообразования в ходе обработки реактивом Тамма труднорастворимого Fe(II)-оксалата ( $FeC_2O_4 \cdot 2H_2O$ ), который занижит величину Fe окс.

Сопоставим действие данных реактивов в ходе параллельной (традиционной) и последовательной экстракций. Применение последовательной экстракции важно и потому, что в мировой практике используют именно последовательную схему при анализе форм соединений тяжелых металлов (Водяницкий, 2003). Но примеров последовательной экстракции соединений Fe в литературе нет.

Цель работы состояла в усовершенствовании характеристики оглеения почв на основе состояния Fe.

В Пермской обл. изучали 2 катены почв на элювии и делювии верхнепермских отложений. Катена Орлы в Ильинском р-не протяженностью ~800 м расположена на склоне и представлена 3 разрезами. В верхней части склона образовался агролитозем темногомусовый (разр. 71); в средней – агробурозем (разр. 72) и на подошве склона – темногомусово-глеевая почв

ва (разр. 73). Почвообразующие породы соответственно: элювий мергеля, элювий и делювий красноцветных пермских глин. По гранулометрическому составу почвы относятся в основном к легкой глине.

Катена Соболи в г. Пермь протяженностью ~ 2000 м расположена на водораздельном плато и склоне и представлена 5 разрезами. На плато образовались агродерново-подзолистая почва среднесуглинистого состава (разр. 61), а в микропонижении – агродерново-подзолистая глееватая почва тяжелосуглинистого состава (разр. 62). На верхней части склона образовался агробурозем на легкой глине, подстилаемой супесью (разр. 63); в средней части склона – темногумусово-глеевая на легкой глине (разр. 64) и в нижней части склона – перегнойно-гумусово-глеевая почва на легкой глине (разр. 65).

На территории г. Пермь изучены две аллювиальные почвы в пойме рек Ласва и Мулянка. Из этих почв для последующего изучения извлечены Fe-новообразования: роренштейны и ортштейны.

*Химические методы* включали определение содержания железа после обработок кислым оксалатом аммония по Тамму (Fe окс) и дитионит-цитрат-бикарбонатом по Мера–Джексону (Fe дит), выполняемых по параллельной или последовательной схемам (Водяницкий, 2003; Зонн, 1982). При параллельной схеме использовались две навески почвы, и Fe дит-парал определяли из отдельной навески. При последовательной схеме использовалась одна навеска, из которой Fe дит-посл исследовали после железа по Тамму Fe окс. Величины Fe окс и Fe дит после каждой из обработок определяли атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре ААС-3.

Аддитивность вытяжек проверяли путем сравнения эффективности двух схем экстракции путем подсчета разницы:  $\Delta Fe = Fe \text{ дит-парал} - (Fe \text{ окс} + Fe \text{ дит-посл})$ . В случае соблюдения аддитивности вытяжек должно соблюдаться примерное равенство действия двух схем и  $\Delta Fe \sim 0$ . Примем, что небольшие отклонения от равенства  $\Delta Fe = \pm 0.1\%$  обусловлены неизбежными ошибками эксперимента, но более значительные отклонения уже вызваны принципиальными причинами. При неполной экстракции труднорастворимых Fe(II)-оксалатов в ходе обработки реактивом Тамма будет наблюдаться неравенство  $\Delta Fe > 0.1\%$ . В случае влияния Fe(II)-минералов будет наблюдаться другое неравенство  $\Delta Fe < -0.1\%$ .

*Критерий Швертмана* рекомендуют использовать во всем мире как критерий гидроморфизма почв (World reference..., 1994). Критерий Швертмана ранее рассматривали как долю аморфных соединений от всех свободных, т. е. от содержания (гидр)оксидов Fe(III). Затем было уточнено, что этот критерий характеризует долю аморфных + слабокристаллизованных соединений (Водяницкий, 2003).

Но чувствительность критерия к переувлажнению почв объясняют по-разному. Сам Швертман (Schwertmann, 1988) не рассматривает данное отношение как критерий гидроморфизма, вероятно, потому, что оно отражает степень оглеения не во всех условиях. Действительно, критерий Швертмана остается низким для глея, если он унаследован или образуется при промывном режиме влажности. Швертман подчеркивает другое свойство своего критерия, а именно – его увеличение при росте содержания органического вещества в почве (Schwertmann, 1988).

Исследования других авторов показали, что при актуальном оглеении, особенно в застойном режиме влажности, критерий Швертмана закономерно возрастает, что позволило его ввести как диагностический показатель для выделения глееослей в проекте Международной базы почвенных данных (World reference..., 1994). Иногда высокие значения критерия Швертмана, характерные для оглеенных почв, объясняют увеличением доли аморфных соединений. Но микробиологи (Munch, Ottow, 1980; Roden, Zachara, 1996; Zachara et al., 1998) доказали, что в закрытой системе в первую очередь редуцируются как раз аморфные и слабокристаллизованные соединения Fe(III). Следовательно, доля рентгеноаморфных гидроксидов железа снижается, что приводит к относительному накоплению в оглеенных почвах устойчивых кристаллических соединений Fe(III). Этот установленный микробиологами факт четко подтверждается данными мессбауэровской спектроскопии почв (Бабанин и др., 1995). Согласно им по мере развития переувлажнения средние размеры кристаллов (и степень окристаллизованности) гидроксидов железа увеличиваются. Такая закономерность прослеживается в почвах Русской равнины и других регионов мира.

Таким образом, должны быть другие причины увеличения отношения Fe окс : Fe дит в оглеенных горизонтах. Одна из причин кроется в высокой чувствительности оксалата аммония к присутствию Fe(II), которое каталитически ускоряет растворение Fe(III)-(гидр)оксидов (Водяницкий, 2001, 2003; Rhoton et al., 1981). Этим же объясняется нарушение условия  $K_{III} \leq 1$ , когда явно фиксируется неаддитивность вытяжки Тамма, как экстрагента доли тонких и неупорядоченных Fe(III)-(гидр)оксидов от всех Fe(III)-(гидр)оксидов.

Источником другой ошибки критерия Швертмана может быть выпадение в осадок части Fe(II)-оксалата в ходе обработки почвы по Тамму, хотя основная часть Fe-оксалатов экстрагируется. Швертман и Корнел (Schwertmann, Cornell, 2000) в модельных опытах установили, что при количестве оксалата менее 1 мл на 1 мг экстрагированного железа образуется желтый осадок  $Fe_2C_2O_4$ , что вносит погрешность в величину Fe окс и занижает критерий Швертмана. Эти выводы, полученные на моделях, должны быть скорректированы при изучении почв. Хотя при обработке почв

содержание раствора оксалата примерно в 20–30 раз выше количества экстрагированного Fe, но в почвах анионы оксалата расходуются не только на образование солей железа, но и других металлов (Al, Ca, Mn и др.).

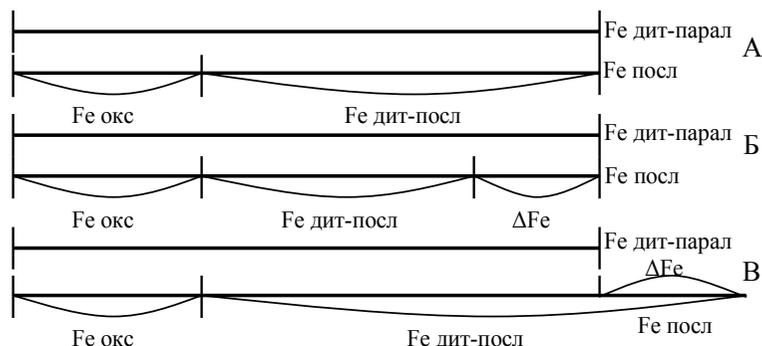
*Цвет почв* Предуралья определяли на спектроколориметре «Пульсар» с интегральной сферой. Обработка результатов с помощью компьютера дает характеристику цвета почвы в системе CIE-L\*a\*b\* (Водяницкий, Шишов, 2004), которая в декартовых координатах количественно отражает вклад четырех основных цветов. Ось абсцисс характеризует степень красноты (+a\*) и зелености почвы (–a\*), а ось ординат – степень желтизны (+b\*) и синевы (–b\*). Точка в начале координат характеризует серый цвет. Третья ось, перпендикулярная плоскости a\*–b\*, определяет светлоту почвы L\* (Водяницкий, Шишов, 2004; Barron, Torrent, 1986). Для численной оценки цвета использовали методику (Водяницкий, Шишов, 2004), согласно которой вначале определяется показатель красочности почвы R(ab):

$$R(ab) = a(a^2 + b^2)^{1/2} / 7b.$$

Затем по эмпирическому уравнению подсчитывается содержание в почве условного красного пигмента  $Нem_{ycl}$  (в %):

$$Нem_{ycl} = [R(ab) - 0.54] : 1.97.$$

*Дисбаланс в содержании железа при разных схемах фракционирования.* В почвах на элювии и делювии верхнепермских отложений ожидаемое примерное равенство экстракций, т. е.  $\Delta Fe = \pm 0.1\%$ , наблюдается редко. Равенство содержания железа, экстрагируемого по двум схемам, представлено на рисунке А. Чаше отмечается тот или иной дисбаланс.



**Иллюстрация** экстракции Fe при параллельной и последовательной схемах обработки. А – результаты экстракции по двум схемам совпадают,  $\Delta Fe = 0$  и  $K_{III} = K_{II}$ ; Б – при последовательной схеме экстрагируется меньше Fe, чем при параллельной обработке за счет неполного растворения дитионитом Fe(II)-оксалата,  $\Delta Fe > 0$  и  $K_{III} < K_{II}$ ; В – при последовательной схеме экстрагируется больше Fe, чем при параллельной обработке за счет каталитического влияния Fe(II)-минералов почвы (сидерита, пирита и т.д.) на растворение Fe(III)-минералов реактивом Тамма,  $\Delta Fe < 0$  и  $K_{III} > K_{II}$ .

Согласно нашим данным (табл. 1), при последовательной схеме после обработки оксалатом аммония реактив Мера–Джексона из многих почв извлекает сравнительно мало железа. В результате для большинства образцов наблюдается неравенство:  $\Delta Fe = [Fe \text{ дит-парал} - (Fe \text{ окс} + Fe \text{ дит-посл})] > 0$ . Эта ситуация схематично отражена на рисунке Б. Размеры несогласия двух методик варьируют: величина  $\Delta Fe$  колеблется от –0.12 до 0.66% в разрезах катены Орлы и от 0.09 до 0.79% – в разрезах катены Соболи.

Вероятная причина положительного дисбаланса – образование в ходе экстракции железа реактивом Тамма осадка Fe(II)-оксалата. Гипотеза об образовании Fe(II)-оксалата согласуется с опытом, где установлено новообразование Zn(II)-оксалата. После обработки почвы кислым оксалатом аммония по данным синхротронного рентгеновского анализа образуется значительное количество оксалата Zn(II), включающего до половины валового цинка (Scheinost et al., 2002). Последующая более сильная восстановительная обработка (аскорбиновая кислота + кислый оксалат аммония) при температуре 96°C оказалась мало эффективной: после нее сохранилась половина новообразованного оксалата цинка. Отмечается также образование вторичных слабо растворимых оксалатов Fe, Al и Ca (Pickering, 1986). Следовательно, есть основание полагать, что положительная величина  $\Delta Fe$  характеризует снижение эффективности реактива Тамма: в остатке почвы сохраняются не полностью растворимые дитионитом новообразованные соединения железа, вероятно,  $FeC_2O_4 \cdot 2H_2O$ . Результаты моделирования это предположение подтвердили. Нами доказано, что с ростом дозы  $FeC_2O_4 \cdot 2H_2O$  от 0.25 до 2.0% Fe растворимость оксалата дитионитом по Мера–Джексону снизилась закономерно с 80 до 55%. Растворимость дитионитом Fe(II)-оксалата – величина переменная и будет снижаться в почве с высоким количеством новообразованного Fe(II)-оксалата. В другом модельном опыте нами показано, что в системе с небольшим количеством гематита (1–2%) добавление Fe(II)-оксалата тормозит растворение Fe-фаз.

Иная ситуация отмечена в аллювиальных почвах в г. Пермь. Здесь значения критерия гидроморфизма  $K_{III}$  снизились по сравнению с критерием Швертмана. Причиной этого может быть влияние Fe(II)-минералов, служащих катализатором при растворении Fe(III)-минералов реактивом Тамма. Действительно, по данным мессбауэровской спектроскопии в аллювиальной почве в пойме р. Ласва выявлен глауконит – сложный алюмосиликат, в котором Mg обычно замещен на  $Fe^{2+}$ . В наилке этой почвы доля Fe(II) в глауконите составляет 8% от валового Fe. В аллювиальных почвах других малых рек г. Пермь источником Fe(II) служит литогенный хлорит. За счет него содержание Fe(II) в наилке достигает 20%, а в мелкоземной мусового горизонта – до 12% от валового Fe.

**Таблица 1.** Цвет почв, выраженный через содержание условного красного пигмента; содержание железа, экстрагированного по параллельной и последовательной схемам из лесных почв Предуралья; критерий Швертмана и новый критерий гидроморфизма почв

Горизонт, глубина, см	Нем <sub>усл</sub>	Fe в параллельной схеме		Fe дит в последовательной схеме	Сумма Fe в последовательной схеме	ΔFe	K <sub>Ш</sub>	K <sub>ГП</sub>
		окс	дит					
		%						
Разр. 71. Агролитозем темногумусовый, катена Орлы								
PU, 0–25	0,25	0,25	1,57	1,04	1,29	0,28	0,16	0,19
С <sub>Ca</sub> , 25 и >	0,60	0,02	0,50	0,48	0,50	0,00	0,04	0,04
Разр. 72. Агробурозем, катена Орлы								
PY <sub>п</sub> , 0–29	0,55	0,23	2,27	1,60	1,83	0,44	0,10	0,13
BM <sub>1</sub> , 29–40	0,79	0,16	2,40	1,75	1,91	0,49	0,07	0,08
BM <sub>2</sub> , 40–70	0,93	0,12	2,99	2,22	2,34	0,65	0,04	0,05
BC, 70–110	1,02	0,07	2,90	2,20	2,27	0,63	0,02	0,03
C, 110–130	1,19	0,04	3,00	2,40	2,44	0,56	0,01	0,02
Разр. 73. Темногумусово-глеевая почва, катена Орлы								
AU, 2–30	0,02	0,60	1,32	0,81	1,41	-0,09	0,45	0,42
BT <sub>g</sub> , 30–45	0,20	0,34	0,90	0,70	1,04	-0,14	0,38	0,33
G, 45–59	0,00	0,45	1,16	0,67	1,12	0,04	0,39	0,40
BT, 59–71	0,56	0,25	1,44	1,08	1,33	0,11	0,17	0,19
C <sub>1</sub> , 105–120	0,79	0,20	2,77	2,00	2,20	0,57	0,07	0,09
C <sub>2</sub> , 120–140	0,58	0,25	1,53	1,04	1,29	0,24	0,16	0,19
Разр. 61. Агродерново-подзолистая почва, катена Соболи								
PY, 0–29	0,08	0,37	1,19	0,64	1,01	0,18	0,31	0,37
EL, 29–40	0,11	0,25	1,16	0,71	0,96	0,20	0,22	0,26
BT, 60–90	0,48	0,23	1,55	1,13	1,36	0,19	0,15	0,17
C, 140–150	0,08	0,19	1,79	1,19	1,38	0,41	0,11	0,14
Разр. 62. Агродерново-подзолистая глееватая почва, катена Соболи								
PY <sub>g</sub> , 0–30	0,02	0,57	1,42	0,66	1,23	0,19	0,40	0,46
BE <sub>Lg</sub> , 30–50	0,24	0,52	1,67	0,93	1,45	0,22	0,31	0,36
BT <sub>1</sub> , 50–70	0,37	0,46	1,69	0,86	1,32	0,37	0,27	0,35
C, 140–160	0,42	0,25	1,70	1,16	1,41	0,29	0,15	0,18
Разр. 63. Агробурозем, катена Соболи								
PY, 0–30	0,30	0,18	1,79	1,35	1,53	0,26	0,10	0,12
BM <sub>1</sub> , 30–49	0,36	0,11	1,91	1,39	1,50	0,41	0,06	0,07
BM <sub>2</sub> , 49–71	0,61	0,08	2,85	1,97	2,05	0,80	0,03	0,04
BC, 71–91	0,52	0,07	1,78	1,41	1,48	0,30	0,04	0,05
C, 100–140	0,39	0,05	1,81	1,40	1,45	0,36	0,03	0,03

**Таблица 1.** Окончание

Горизонт, глубина, см	Нем <sub>усл</sub>	Fe в параллельной схеме		Fe дит в последовательной схеме	Сумма Fe в последовательной схеме	ΔFe	K <sub>Ш</sub>	K <sub>ГП</sub>
		окс	дит					
		%						
Разр. 64. Темногумусово-глеевая почва, катена Соболи								
AU, 5–31	0,06	0,35	1,69	1,20	1,55	0,14	0,21	0,23
B <sub>g</sub> , 31–52	0,11	0,33	1,72	1,26	1,59	0,13	0,19	0,21
G, 52–79	0,00	0,39	2,21	1,07	1,46	0,75	0,18	0,27
C, 120–130	0,46	0,17	1,48	1,13	1,30	0,18	0,11	0,13
Разр. 65. Перегнойно-гумусовая глеевая почва, катена Соболи								
A, 2–33	0,01	0,66	1,41	0,57	1,23	0,18	0,47	0,54
G, 33–56	0,00	0,64	1,90	0,94	1,58	0,32	0,34	0,40
B <sub>g</sub> , 56–80	0,10	0,59	2,04	1,19	1,78	0,26	0,29	0,33

*Новый критерий гидроморфизма почв.* Выявить влияние всех факторов, определяющих причину дисбаланса в содержании железа в почвах разного генезиса, не представляется возможным. Это исключает внесение поправки в величину Fe окс. Но для целей группировки важно, чтобы варьирование диагностического показателя не выходило за жесткие рамки, например, от 0 до 1. Поэтому будем использовать результаты химического фракционирования железа по последовательной схеме. Новый, критерий гидроморфизма почв  $K_{ГП}$ , отражающий долю оксалаторастворимых соединений железа от суммы всех свободных, выражается как

$$K_{ГП} = \text{Fe окс} : (\text{Fe окс} + \text{Fe дит-пол.})$$

Новый критерий по своей структуре не выходит за указанные рамки. Он представляет собой долю экстрагируемых оксалатных комплексов Fe + исходных Fe(II)-соединений от всех (гидр)оксидов Fe(III) + Fe(II)-соединений в почве. Последние включают (гидр)оксиды (магнетит, грин раст), сульфиды (пирит), карбонаты (сидерит), алюмосиликаты (глауконит и др.).

Таким образом, новый критерий учитывает присутствие в почве другой группы (помимо аморфных и слабокристаллизованных Fe(III)-(гидр)оксидов) реакционноспособных соединений, а именно соединений Fe (II). В этом преимущество нового критерия гидроморфизма перед критерием Швертмана при характеристике оглеенных почв, где содержание Fe (II)-минералов может быть ощутимым.

В табл. 1 приведены значения критерия Швертмана  $K_{Ш}$  и нового критерия гидроморфизма  $K_{ГП}$ . Значения критерия гидроморфизма  $K_{ГП}$  для почв на элювии и делювии верхнепермских отложений в целом немного воз-

росли. Чтобы сравнить эффективность двух критериев, сопоставим их с цветом почв, выраженным в системе CIE-L\*a\*b\*. Степень красноты почв характеризуется содержанием условного красного пигмента  $Nem_{усл}$ , значения которого варьируют от 0 в оглеенных горизонтах до 1.0–1.1 % в красных метаморфических иллювиальных горизонтах. Известно, что критерий Швертмана реагирует на гидроморфизм увеличением своего значения (World reference..., 1994). Следовательно, между его величиной и  $Nem_{усл}$  должна быть обратная связь. Проверим согласие двух критериев с цветом почв. Корреляционный анализ показал, что между  $Nem_{усл}$  и критерием Швертмана  $K_{Ш}$  имеет место ожидаемая обратная статистическая связь:  $r = -0.75$ . У нового критерия  $K_{ГП}$  степень обратной связи с цветом почвы такая же  $r = -0.77$ .

Теперь сравним морфологию горизонтов со значением нового критерия  $K_{ГП}$ . В ряде почв (агролитозем, агробурозем и др.) оба показателя согласуются, например, отсутствие морфологического проявления оглеения сочетается с низкими значениями критерия  $K_{ГП}$ . Но в других разрезах ожидаемого согласия нет. В основном выбиваются гумусовые горизонты AU, PY и A темногумусово-глеевой, агродерново-подзолистых и перегнойно-гумусовой глеевой почв, где критерий  $K_{ГП}$  варьирует от 0.37 до 0.54, что отвечает слабому или среднему гидроморфизму. Отсутствие видимых признаков оглеения объясняется маскировкой сизых пятен гумусом. Один из первых на это обратил внимание Л.Л. Шишов (1962), фиксируя очень низкие значения редокс-потенциала  $E_H$  в гумусовых горизонтах дерново-глеевых почв.

Рассмотрим иллювиальные почвы в г. Пермь. Здесь значения нового критерия гидроморфизма  $K_{ГП}$  снизились по сравнению с критерием Швертмана, вероятно, за счет Fe (II)-минералов. В разрезе иллювиальной почвы в пойме р. Ласьва сопоставление двух критериев гидроморфизма показало более тесную связь с цветом для нового критерия ( $r = -0.52$ ) по сравнению с критерием Швертмана ( $r = -0.26$ ). В разрезе иллювиальной почвы в пойме р. Мулянка одинаково тесная связь с цветом для нового критерия ( $r = -0.80$ ) и для критерия Швертмана ( $r = -0.78$ ). Предложена шкала градации гидроморфизма почв на основании критерия гидроморфизма  $K_{ГП}$  (табл. 2).

Согласно ей в лесных почвах на элювии и делювии верхнепермских отложений гидроморфизм отсутствует или выражен слабо. В иллювиальных почвах он выражен в слабой или средней степени. Можно применить критерий  $K_{ГП}$  и к железистым новообразованиям. При этом значения критерия уже нельзя рассматривать как характеристику гидроморфизма, а следует рассматривать в первоначальном смысле, как долю аморфных и слабоокристаллизованных Fe(III)-(гидр)оксидов + Fe(II)-соединений от всех (гидр)оксидов Fe(III) + Fe(II)-соединений в почве.

**Таблица 2.** Шкала градации гидроморфизма

Гидроморфизм	$K_{ГП}$
Отсутствует	0–0.15
Слабый	0.15–0.30
Средний	0.30–0.45
Сильный	0.45–0.60
Очень сильный	0.60–1.0

В составе роренштейнов и ортштейнов, выделенных из иллювиальных почв, судя по значениям  $K_{ГП} = 0.4–0.8$ , преобладает средняя и высокая доля аморфных и слабо окристаллизованных Fe(III)-(гидр)оксидов + Fe(II)-соединений.

*Благодарность.* Автор благодарит М.Н. Власова, В.Ю. Гилева и К.А. Румянцеву за помощь в проведении экспериментов.

#### ВЫВОДЫ

1. Критерий Швертмана  $K_{Ш} = Fe \text{ окс} : Fe \text{ дит}$ , основанный на параллельной схеме экстракции реактивами Тамма и Мера–Джексона и используемый для характеристики оглеения, не ограничен верхним пределом, что затрудняет градацию оглеенных почв. Для ограничения показателя жесткими рамками (от 0 до 1) предложен новый критерий гидроморфизма почв:  $K_{ГП} = Fe \text{ окс} : (Fe \text{ окс} + Fe \text{ дит-посл})$ . Он основан на последовательной схеме экстракции железа и представляет собой долю аморфных и слабо окристаллизованных Fe(III)-(гидр)оксидов + Fe(II)-соединений от всех (гидр)оксидов Fe(III) + Fe(II)-соединений в почве.

2. В лесных почвах Предуралья на продуктах выветривания верхнепермских отложений в основном  $K_{ГП} > K_{Ш}$ , вероятно, за счет образования в ходе экстракции по Тамму прочного сорбированного Fe(II)-оксалата, который слабо растворяется реактивом Мера–Джексона.

В иллювиальных почвах г. Пермь в основном  $K_{ГП} < K_{Ш}$ , вероятно, за счет влияния Fe(II)-минералов, служащих катализатором при растворении Fe(III)-минералов реактивом Тамма. Новый критерий гидроморфизма лучше, чем критерий Швертмана согласуется с цветом лесных почв Предуралья.

3. Дана шкала градации гидроморфизма почв на основании критерия гидроморфизма  $K_{ГП}$ . Согласно ей в лесных почвах на элювии и делювии верхнепермских отложений гидроморфизм отсутствует или выражен слабо. В иллювиальных почвах он выражен в слабой или средней степени.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В. Магнетизм почв. М.–Ярославль, 1995. 222 с.  
 Водяницкий Ю.Н. О растворимости реактивом Тамма железистых минералов // Почвоведение. 2001. № 10. С. 1217–1229.  
 Водяницкий Ю.Н. Химия и минералогия железа в почвах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2003. 238 с.

*Водяницкий Ю.Н.* Изучение тяжелых металлов в почвах М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2005. 108 с.

*Водяницкий Ю.Н., Шишов Л.Л.* Изучение некоторых почвенных процессов по цвету почв М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2004. 88 с.

*Зонн С.В.* Железо в почвах. М.: Наука, 1982. 206 с.

*Шишов Л.Л.* Окислительно-восстановительный потенциал дерново-глеевых почв // Докл. ТСХА. 1962. Вып. 76.

*Barron V., Torrent J.* Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil color // J. Soil Sci. 1986. V. 37. p.499-510.

*Munch J. C., Ottow J. C. G.* Preferential Reduction of Amorphous to Crystalline Iron Oxides by Bacterial Activity // Soil Science. 1980. V. 129. P. 15–21.

*Pickering W.F.* Metal ion speciation – soil and sediments (a review) // Ore Geol. Rev. 1986. V.1. N 1. P. 83–146.

*Scheinost A.C., Krerzchmar R.S., Prister S., Roberts D.R.* Combining selective sequential extractions, X-ray absorptoin spectroscopy, and principal component analysis for quantitative zinc speciation in soil // Environ. Sci. Technol. 2002. V. 36. P. 5021–5028.

*Schwertmann U.* Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironment // Iron in soils and clay minerals. NATO. Dordrecht: Reidel. 1988. P. 267–308.

*Schwertmann U., Cornell R.M.* Iron oxides in the laboratory. WILEY-VCH. Weinheim (FRG). 2000. 188 p.

*Rhoton F.E., Bigham J.M., Norton L.D., Smeck N.T.* Contribution of magnetite to oxalate-extractable iron in soils and sediments from the Maumee River basin of Ohio // Soil Sci. Soc. Am. J. 1981. V. 45. N 3. P. 645–649.

*Roden E.E., Zachara J.M.* Microbial reduction of crystalline Fe(III) oxides: influence of oxide surface area and potential for cell growth // Environ. Sci. Technol. 1996. V. 30. P.1618–1628.

World reference base for soil resources. Draft. Isss/Isric/Fao, Wageningen-Rome. 1994. 161 p.

*Zachara J.M., Fredrickson J. K., Li S., Kennedy D.W., Smith S.C., Gassman P.L.* Bacterial reduction of crystalline Fe<sup>3+</sup> oxides in single phase suspensions and subsurface materials // Am. Miner. 1998. V. 83. P. 1426–1443.