

## **ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ**

УДК 631.6: 502.7(438)

### **ХАРАКТЕРИСТИКА ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В МЕЛИОРИРОВАННЫХ ПОЧВАХ ПОЛЬШИ**

**Я. Островски**, профессор, доктор сельскохозяйственных наук  
Институт мелиорации и луговодства, Фаленты, Польша

*Ключевые слова:* мелиорация, минеральные почвы, окислительно-восстановительные процессы, водно-воздушный режим

#### **Введение**

Интенсивное развитие мелиоративных работ в Польше датируется второй половиной XX в. За это время проведены работы по дренажу пахотных почв на площади около 4 млн. га, а мелиоративные осушительно-оросительные системы построены на площади около 2 млн. га заболоченных лугов и пастбищ. Не всегда оправданные экономические затраты, а также отрицательное влияние на экологические условия и формирование водных ресурсов вызвали необходимость пересмотра целесообразности их функционирования.

Основой для изменения существующего подхода к мелиорациям являются достижения в изучении кислородного питания растений и его связи с окислительно-восстановительными процессами в почвах.

Комплексными исследованиями этих процессов польские почвоведы занимаются уже почти полвека, что связано с необходимостью оценки водно-воздушного режима почв во время полевых почвенно-картографических работ, проводимых по всей стране с целью создания крупномасштабных почвенно-агрономических и почвенно-мелиоративных карт сельскохозяйственных угодий.

Рассматривая почву как трехфазную систему, следует подчеркнуть антагонистический характер взаимодействия жидкой (вода) и газовой (кислород) фазы почвы. Излишек кислорода (при недостатке воды) усиливает процессы окисления, способствующие деградации органического вещества, а избыток воды (при недостатке кислорода) ведет к деградации минерального компонента за счет развития восстановительных процессов. Таким образом, мелиоративная корректировка водно-воздушного режима почв должна не только создавать благоприятные условия для развития сельскохозяйственных растений и натуральных экосистем, но и в значительной мере способствовать охране почв от деградации, вызванной недостатком кислорода, обусловленным их переувлажнением. Этот процесс можно назвать гидроокисной деградацией почв, так как в нем равноценную роль играют кислород и вода.

Почвы в различной степени реагируют на развитие окислительно-восстановительных процессов и существенно отличаются по устойчивости к недостатку

кислорода, вызванному их переувлажнением, что отражается на формировании специфических морфологических признаков. Последствием этого является неодинаковая чувствительность к гидроокисной деградации, которая в значительной степени зависит от условий циркуляции воды в почвенном профиле и ее фильтрационных способностей.

***Почвенно-морфологические и химические методы диагностики аноксемии минеральных почв***

Наличие аноксемии минеральной почвы можно обнаружить по изменениям ее окраски, связанным с восстановлением или окислением кислородных соединений железа, которому сопутствуют превращения его валентности. Комплекс этих преобразований вместе с сопутствующими химическими реакциями относят к почвообразовательному процессу, вызывающему оглеение почв.

Изучение морфологических эффектов оглеения, их связи с диагностикой водно-воздушного режима почв и возможностью системной классификации железистых новообразований обосновал Я. Сюта [1], [2]. Исходной основой его исследований являются три предпосылки:

- восстановление кислородных соединений железа вызывает цветовые эффекты, заключающиеся в образовании сизоватых и голубоватых пятен или горизонтов, являющихся морфологическим признаком оглеения;
- процессы оглеения имеют динамический характер и прекращаются с моментом притока кислорода, обеспечивающего потребности биохимических процессов и обратное окисление соединений железа;
- восстановленные соединения железа растворимы в воде и в виде раствора могут подвергаться перемещению в почвенном профиле, а после обратного окисления выпадают из раствора и аккумулируются в виде различных новообразований.

Созданная Я. Сюта классификация глеевых и железистых образований является основой диагностики так называемых категорий водного режима почв, применяемых для их агропроизводственной оценки [3]. На этой классификации основана методика оценки потребностей в дренаже пахотных почв по морфологическим признакам, подробно изложенная [4].

Официальная рекомендация этого метода для применения в предпроектных почвенно-мелиоративных экспертизах до сих пор не потеряла своей актуальности. Однако, в связи с качественным подходом к оценке, ее результаты ограничились только до выделения почв, нуждающихся в дренаже, и не могли быть использованы в качестве технических параметров при проектировании дренажных систем.

Особенная роль окислов железа в формировании кислородного режима почвенной среды и гидроокисной деградации почв являлась инспирацией исследований электрохимических условий восстановительных процессов. Их эффектом по отношению к железу является стабилизация окислительно-восстановительного потенциала на уров-

не около +300 mV. Время  $t_{300}$ , в течение которого под влиянием аноксемии окислительно-восстановительный потенциал понижается до уровня +300 mV, Глински и Степневска [5] считают показателем устойчивости почв к восстановительным процессам, или показателем окислительно-восстановительной устойчивости почв.

Многолетние исследования показателя  $t_{300}$  привели к характеристике окислительно-восстановительной устойчивости почв и ее картографическому изображению, представленному в соответствующем атласе [6]. На его основе в табл. 1 представлена характеристика  $t_{300}$  десяти важнейших минеральных почв Польши при различной температуре почвы в трех основных горизонтах – пахотном, подпахотном и „подпочвенном”: 60 (70) – 90 (100) см.

Данные табл. 1 показывают, что время  $t_{300}$  сокращается по мере увеличения температуры почвы и удлиняется по глубине почвенного профиля. Наиболее чувствительны к аноксемии рендзины и лёссовые почвы (чернозёмы, бурые лесные), а самой большой устойчивостью обладают песчаные и супесчаные почвы.

**Таблица 1. Характеристика окислительно-восстановительной устойчивости некоторых пахотных почв ( $t_{300}$  – сутки)**

Почвы	Горизонты	Температура почвы, °C			
		4	10	15	20
Рендзины	Пахотный	<10	<3	<1	<1
	Подпахотный	5-15	<3	<2	<2
	Подпочвенный	<10	<3	1-2	<1
Чернозёмы	Пахотный	<10	<3	1-2	<1
	Подпахотный	15-25	3-5	<2	<2
	Подпочвенный	10-20	2-5	2-5	<2
Лёссовидные бурые лесные и палевые	Пахотный	10-15	3-5	1-2	<1
	Подпахотный	5-15	3-5	<2	<2
	Подпочвенный	10-20	5-10	2-5	2-4
Глинистые и пылевидные темноцветные (чёрные земли)	Пахотный	15-20	3-5	2-3	1-2
	Подпахотный	15-25	5-7	2-5	2-4
	Подпочвенный	20-40	5-10	2-5	2-4
Тяжелые аллювиальные	Пахотный	>20	5-7	2-3	1-2
	Подпахотный	15-25	5-7	2-5	2-4
	Подпочвенный	20-40	5-20	2-5	2-4
Глинистые бурые лесные и палевые из плотных горных пород	Пахотный	15-20	3-5	2-3	1-2
	Подпахотный	>25	7-10	5-8	2-4
	Подпочвенный	20-40	10-15	5-10	4-8
Пылевидные палевые	Пахотный	>20	5-7	2-3	1-2
	Подпахотный	>25	>10	5-8	2-4
	Подпочвенный	>40	15-20	5-10	4-8
Песчаные на суглинистых породах палевые (поверхностно-глиевые)	Пахотный	>20	>10	5-7	>3
	Подпахотный	>25	>10	>8	>6
	Подпочвенный	20-40	10-15	5-10	4-8
Легкосуглинистые бурые лесные	Пахотный	>20	7-10	5-7	>3
	Подпахотный	>25	>10	>8	>6
	Подпочвенный	20-40	10-15	5-10	>8
Ржавые и дерново-подзолистые песчаные	Пахотный	>20	7-10	3-5	>3
	Подпахотный	>25	>10	>8	>6
	Подпочвенный	>40	>20	>10	>8

Определение этого свойства почв не является прямым показателем потребностей их осушения (дренажа), так как оно характеризует потенциальные условия аноксемии, но не отражает обстоятельств ее появления (развития).

***Определение условий аноксемии минеральных пахотных почв и методические предпосылки ее мелиоративного предотвращения***

Как уже говорилось, аноксемия почвенной среды возникает при условии полного насыщения почвенных пор водой, удерживаемой почвой в течение большего времени, чем  $t_{300}$ , параметризирующее ее окислительно-восстановительную устойчивость.

Переувлажнение почвы зависит от условий поступления воды, а также причин и динамики ее перемещения в почвенном профиле. Водный режим большинства пахотных почв Польши формируется за счет осадков и поверхностного стока. Такой тип водного режима является основой моделирования движения воды и ее задержки в почвенном профиле. Продолжительность полного насыщения почвы водой зависит от количества макропор, по которым вода перемещается вглубь почвенного профиля под влиянием гравитационных сил, уступая место воздуху, содержащему кислород.

При представленной схеме циркуляции воды в почвенном профиле искомым параметром является время освобождения крупных пор от воды, т.е. время перехода от полного насыщения водой до ее содержания, соответствующего полевой влагоемкости. Это время, обозначенное символом  $T_{пв}$ , определено как время самоокисления почвы (путем аэрации) [7].

Гравитационный расход воды в пределах от полной до полевой влагоемкости неравномерен, а его замедление связано с увеличением водоудерживающей способности почвы в условиях вертикального потока, не подвергающегося воздействию уровня грунтовых вод.

Математическое описание этого процесса представлено в модели движения воды в почвенном профиле, разработанной в Институте Агрофизики ПАН во время проведения исследований гидрофизических свойств пахотных почв Польши. Суть формулировки заключается в представлении движения воды с помощью мономерных уравнений первой степени с учетом плотности потока воды, зависящей от коэффициента фильтрации и водоудерживающей способности почвы в виде потенциала, рассчитываемого по уравнению ван Генухтена.

Программирование этой модели, содержащей систему уравнений, позволяет решать их цифровым способом. Благодаря математическому определению граничных условий, становится возможным расчет времени  $T_{пв}$ , в течение которого почва, полностью насыщенная водой в каждом из горизонтов, достигает увлажнения, соответствующего полевой влагоемкости.

Для параметризации этого процесса и определения  $T_{пв}$  необходимо определить водопроницаемость пахотных почв Польши при полном насыщении их водой и увлажне-

нии, соответствующем полевой влагоемкости. Эти исследования были проведены в Институте Агрофизики ПАН [8] на образцах с ненарушенной структурой, собранных в банке почвенных образцов [9], и использованы для расчета  $T_{пв}$  (с точностью до 0,5 суток), характерного для пахотных почв в 100-сантиметровом слое, с учетом трех исследуемых горизонтов: пахотного, подпахотного и „подпочвенного”.

Сравнение величин  $t_{300}$  и  $T_{пв}$  в соответствующих горизонтах характеризуемых почв показывает, что их разница может достигать положительных и отрицательных величин, а также, что  $t_{300}$  может быть больше или меньше  $T_{пв}$ . Истолкование этого явления приводит к выводу, что насыщенность почвенной среды кислородом тем лучше, чем больше окислительно-восстановительная устойчивость почвы и ее способность к воздухообмену. В противоположном случае, т.е. когда понижение окислительно-восстановительного потенциала быстрее времени освобождения пор от гравитационной воды, возникает аноксемия почвенной среды, которая может вызвать необратимое разрушение минерального компонента почвы. Это тесно связано с представленными морфологическими эффектами восстановления кислородных соединений железа и с возможностью количественного определения условий проявления гидроокисной деградации почв.

Руководствуясь представленными выше наблюдениями и определениями, полагаем, что возможность возникновения условий аноксемии в почвенном профиле или в отдельных его горизонтах можно охарактеризовать абсолютным числом, выражающим соотношение времени понижения окислительно-восстановительного потенциала  $t_{300}$  в условиях полного насыщения почвы водой, имеющей температуру 20°C, к времени гравитационного оттока воды из макропор  $T_{пв}$ . Это соотношение, являющееся показателем потенциальной чувствительности почв к гидроокисной деградации  $D_{ГО}$ , представлено в виде дроби:

$$D_{ГО} = t_{300} / T_{пв}.$$

Такой подход к параметризации условий возникновения в почве аноксемии делает возможным признать чувствительность (податливость) к гидроокисной деградации свойством почвы, которое наравне с другими признаками можно использовать для ее определения. Сам показатель можно использовать для сравнительной характеристики почв. Таким образом, величина  $D_{ГО}$  может быть индикатором аноксемии почвы. В случае, когда  $D_{ГО}$  будет больше единицы, не возникнут условия, способствующие аноксемии, что означает нечувствительность почвы к гидроокисной деградации. Если же время оттока гравитационной воды превысит исчерпаемость молекулярного кислорода, дробь  $D_{ГО}$  будет меньше 1, что указывает на потенциальную податливость почвы к гидроокисной деградации. Определение „потенциальную” применено потому, что действительная деградация может наступить тогда, когда возникнет продолжительное полное насыщение почвы водой и полное использование находящегося в ней молекулярного кислорода.

Состояние аноксемии может охватывать почвенный профиль полностью, отдельные его горизонты или же не появляться вообще. На основании этого предпринята методическая попытка оценки чувствительности почв к гидроокисленной деградации, принимая следующие обозначения и критерии этой оценки:

**Н** – почвы, не чувствительные к гидроокисленной деградации, для которых во всем почвенном профиле показатель  $D_{ГО} \geq 1$ ;

**МЧ** – почвы, малочувствительные к гидроокисленной деградации, для которых условие  $D_{ГО} < 1$  отмечено только в одном из диагностируемых горизонтов – пахотном, подпахотном или „подпочвенном”;

**Ч** – почвы, чувствительные к гидроокисленной деградации, у которых показатель  $D_{ГО} > 1$  характеризует два из трех диагностируемых горизонтов;

**ОЧ** – почвы, очень чувствительные к гидроокисленной деградации, у которых  $D_{ГО} > 1$  во всех диагностируемых горизонтах.

На основании исследований окислительно-восстановительной устойчивости минеральных пахотных почв [6] и их водопроницаемости [8], применяя вышепредставленную модель, рассчитаны  $T_{ПВ}$  и  $D_{ГО}$  для важнейших пахотных почв Польши [7].

**Таблица 2. Показатели и оценка чувствительности к гидроокисленной деградации избранных пахотных почв [4]**

Почвы	$D_{ГО}$ в горизонте			Чувствительность*
	пахотный	подпахотный	„подпочвенный”	
Рендзины	0,20	0,14	0,12	ОЧ
Чернозёмы	0,17	0,28	0,20	ОЧ
Лёссовидные бурые лесные и палевые	0,43	0,20	0,54	ОЧ
Глинистые и палевые пылевидные темноцветные (чёрные земли)	0,60	0,75	0,60	ОЧ
Тяжелые аллювиальные	0,60	0,75	1,33	Ч
Глинистые бурые лесные и палевые из плотных горных пород	0,50	0,60	1,09	Ч
Пылевидные палевые	0,33	0,91	1,09	Ч
Песчаные на суглинистых породах палевые (поверхностно-глеевые)	1,80	1,20	0,75	МЧ
Легкосуглинистые бурые лесные	1,50	1,80	1,85	Н
Ржавые и дерново-подзолистые песчаные	1,17	2,25	2,40	Н

\* Пояснение обозначений см. в тексте.

В табл. 2 представлены усредненные величины  $D_{ГО}$  и результаты оценки чувствительности к гидроокисленной деградации десяти избранных пахотных почв (аналогичных представленным в табл. 1). Это позволяет проследить зависимость между этими двумя свойствами пахотных почв Польши, отражающую связь между увеличением их окислительно-восстановительной устойчивости и уменьшением чувствительности к гидроокисленной деградации.

### **Выводы**

1. Итоги исследований подтверждают правильность подхода к изучению окислительно-восстановительных процессов, происходящих в минеральных почвах. Они подчеркивают двойную роль, которую по отношению к почвенной среде играют диагностика и параметризация кислородного состояния почв и его преимущество перед их водным режимом.

2. Правильное насыщение почв кислородом предотвращает их морфологическую и химическую деградацию, а также стабилизирует условия эволюции почвообразовательных процессов. Возможность непрерывного поступления кислорода, обеспечивающего потребности почвенной среды, создает оптимальные условия для развивающейся в ней растительности, метаболизм которой значительно воздействует на формирование и развитие почв. Граничные показатели оптимального насыщения почв кислородом обуславливают их увлажнение, избыток которого способствует развитию процессов восстановления, деградации почвы и оказывает токсическое воздействие на растения, а недостаток влаги нарушает ход биохимических процессов в почвах и вегетации растений.

3. Существенным является практический аспект исследований, придающих новое значение мелиорации в формировании оптимального водного режима, одновременно удовлетворяющего экологические и агропроизводственные потребности. Они подтверждают сущность количественного подхода к оценке водно-воздушного режима почв на основе их морфологических признаков, являющегося также основой параметризации технических решений, применяемых в проектировании дренажных систем. Определение аноксемии почв, вызванной глеевым процессом, по их морфологическим признакам, пополненное изучением их окислительно-восстановительной устойчивости и времени оттока гравитационной воды, перманентный избыток которой сигнализирует о признаках оглеения, можно использовать для гидравлических решений и расчетов сети закрытого дренажа.

4. Практическое применение этого подхода требует проведения дальнейших исследований, направленных на методические решения определения  $t_{300}$  и  $T_{ПВ}$  в рамках почвенно-мелиоративных предпроектных исследований и разработку модели калибровки дренажной осушительной сети с учетом этих параметров.

5. Важным результатом исследований является выявление особенной роли железа в формировании кислородного режима почв. Его кислородные соединения, кроме морфологических преобразований, диагностирующих окислительно-восстановительные процессы, играют существенную роль в стабилизации потенциальных ресурсов кислорода в минеральном компоненте почвы. Кислородные соединения железа являются своего рода аккумулятором кислорода в почве, а технологическая стабилизация кислородного режима почвенной среды должна не только создавать благоприятные агроэкологические условия, но и противодействовать выносу восстановленного железа за пределы почвенного профиля.

**Литература**

1. Siuta J., 1961: Wpływ procesu glejowego na kształtowanie się cech morfologicznych i chemicznych profilu glebowego. Gleby wytworzone z lessu i gleby pylastej. Roczn. Glebozn. IX, 2.
2. Siuta J. 1962: Wpływ procesu glejowego na kształtowanie się cech morfologicznych i właściwości chemicznych Cz. II. Mady Żuławskie Cz. III Gleby bielcowe wytworzone z gleby zwałowej Pom. Puł. 9, 99-149.
3. Strzemeski M., Siuta J., Witek T., 1973. Przydatność rolnicza gleb Polski. PWRiL.
4. Островски Я. Почвенно-мелиоративные исследования в Польской Народной Республике.// Почвоведение. – 1972. – №12.
5. Gliński J., Stępniewska Z., 1986. Wskaźniki odporności gleb na redukcję. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 315:81-94.
6. Stępniewska Z., Stępniewski W., Gliński J., Ostrowski J., 1997. Atlas właściwości oksydoredukcyjnych gleb mineralnych Polski. Lublin, Morspol: 1-48.
7. Ostrowski J., Sławiński C., Walczak R., 2004. Ocena i kartograficzna prezentacja wrażliwości gleb ornich na hydroksoygeniczną degradację. Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie t.4, z. 2a(11):185-200.
8. Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C., 2002. Hydrofizyczne charakterystyki mineralnych gleb ornich Polski. Acta Agrophysica 79:1 – 64.
9. Gliński J., Ostrowski J., Stępniewska Z., Stępniewski W., 1991: Bank próbek glebowych reprezentujących gleby mineralne Polski. Problemy Agrofizyki z. 66:1-61.

**Summary**

**Ostrowski J. THE CHARACTERISTIC OF OXIDATION-REDUCTION PROCESSES IN RECLAIMED SOILS OF POLAND**

The outcomes almost half of a century investigations emphasize a double role, which diagnostics and parametrization of oxygenous state play in relation to soil medium and advantage of this state to water regime. The correct saturation of soils by oxygen prevents their morphological and chemical degradation and also stabilizes conditions for evolution of soil-forming processes. The possibility of continuous receipt of oxygen providing needs of soil medium creates optimal conditions for vegetation developing here and metabolism of the vegetation considerably influences soils formation and development. The boundary parameters for optimal saturation of soils with oxygen cause their humidification surplus of which promotes development of reduction processes, soil degradation and exerts the toxic attack for plants, but a shortage of moisture disturbs progress of biochemical processes in soils and vegetation of plants. In this connection the importance of land reclamation for creation of an optimal water regime satisfying simultaneously ecological and agricultural production requirements is increased. The quantitative approach to an assessment of a water-and-air regime of soils on the basis of their morphological characters is also the basis for parametrization of technical decisions applied in designing drainage systems. It is possible to use determination of the soil anoximy caused by gleyzation process in hydraulic solutions and analyses of the closed drainage network.

The important outcome of introduced investigations is the indicating of an especial role of ferro-compounds in creation of oxygen regime of soils. The oxygen-iron compounds are some kind of an oxygen accumulator in soil, and the technological stabilization of oxygen regime of soil medium owes not only create favorable agro-ecological conditions, but also counteract an removal of reduced iron from soil structure.

*Поступила 25 апреля 2005 г.*