

ЗЕМЛЯРОБСТВА І РАСЛІНАВОДСТВА AGRICULTURE AND PLANT CULTIVATION

УДК 631.433.52:631.445.15(438)

Поступила в редакцию 09.03.2017
Received 09.03.2017**Я. Островский***Институт технологических и естественных наук Фаленты, Польша*

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КИСЛОРОДНОГО СОСТОЯНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ПАХОТНЫХ ПОЧВ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОГО УВЛАЖНЕНИЯ

Представлены результаты исследования параметров окислительно-восстановительной устойчивости пахотных почв Польши и чувствительности различных их видов к гидроокисной деградации. Показано, что важным свойством почв является их окислительно-восстановительная устойчивость, выраженная двумя темпоральными показателями t_{400} и t_{300} , измеряемыми временем удерживания Eh на уровне +400 мВ (восстановление нитратов) и +300 мВ (восстановление окислов трехвалентного железа). Эти окислительно-восстановительные реакции выполняют роль буфера, замедляющего переход переувлажненных почв в состояние анаэробии, а участвующие в них окислы являются натуральными аккумуляторами кислорода в почвенной среде. Для условий промывного водного режима построена модель параметризации гидроокисных условий этих почв с учетом соотношения между этими показателями и гидрофизическими свойствами пахотных почв. Представлены некоторые результаты обследований минеральных пахотных почв Польши, характеризующие их гидроокисные условия. Так, усредненные показатели t_{400} для почв с температурой +20 °C в пахотном слое колеблются от <1 до 1,5 дня, в подпахотном – от <1 до 3 дней, в подпочвенном – от <1 до 5 дней; для t_{300} – 0,5–4,5, 1,0–9,0, 1,0–12,0 дня соответственно. Для T_{ppw} в пахотном слое они достигают 3,0–4,5 дня, в подпахотном – 3,0–8,0 дня, а в подпочвенном – 4,0–19,5 дня [4]. Приведенные параметры используются для совершенствования калибровки осушительных дренажных систем с учетом потребности корректировки кислородного состояния пахотных почв с промывным водным режимом. В выводах обращено внимание на целесообразность углубления знаний относительно кислородного режима минеральных пахотных почв, его агроэкологического значения и мелиоративной корректировки. Эта корректировка должна соответствовать модифицированной парадигме осушительных мелиораций, которая означает, что непосредственной причиной ограничения жизнедеятельности растений и почвенной биоты является недостаток кислорода, а не избыток воды в почве. Агроэкологической составляющей мелиоративной регуляции кислородного режима пахотных почв является возможность их охраны от потерь потенциала плодородия, которыми являются нитраты, а также оксиды железа – натуральные аккумуляторы кислорода в почвенной среде, предохраняющие ее в условиях переувлажнения от состояния анаэробии.

Ключевые слова: кислородный режим почв, анаэробия почв, окислительно-восстановительный потенциал, окислительно-восстановительная устойчивость почв, восстановление нитратов, осушительный режим почв

J. Ostrowski*Institute for Technology and Natural Sciences, Falenty, Poland*

AGROECOLOGICAL ASPECTS OF OXYGEN STATE OF MINERAL ARABLE SOILS IN CONDITIONS OF ATMOSPHERIC HUMIDIFICATION

Results of study of oxidation-reduction stability parameters of arable soils in Poland and sensitivity of various kinds of these soils to hydro-oxygen degradation are presented in the article. It is shown that oxidation-reduction stability, expressed by two temporal values t_{400} and t_{300} is an important property, measured by retention time Eh at the level of +400 mV (nitrate reduction) and +300 mV (ferric oxide reduction). These redox reactions perform as a buffer that slows the transition of waterlogged soils into anoxic state, and the oxides involved are natural accumulators of oxygen in soil environment. A model of parametrization of hydro-oxygen conditions of these soils has been created for conditions of washing water regime, taking into account correlation between these indicators and hydrophysical properties of arable soils. Some results of surveys of

mineral arable soils in Poland are presented, characterizing the hydro-oxygenic conditions of soil. Thus, the average values of t_{400} for soils with a temperature of +20 °C in the arable layer range from <1 to 1.5 days, in the sub-arable layer – from <1 to 3 days, in the subsoil – from <1 to 5 days; for t_{300} – 0.5–4.5, 1.0–9.0, 1.0–12.0 days, respectively. For T_{ppw} in the arable layer they reach 2.5–4.5 days, in the sub-arable layer – 3.0–8.0 days, and in the subsoil – 4.0–19.5 days [4]. The presented values are used to improve the calibration of drainage systems, taking into account the arable soils oxygen state adjustment with washing water regime. In conclusions the attention is paid to advisability of deepening knowledge of the oxygen regime of mineral arable soils, its agroecological significance and land reclamation. This adjustment should correspond to the modified paradigm of drainage reclamation, which means that the direct cause of the restriction of the vital activity of plants and soil biota is a lack of oxygen, but not the water excess in soil. Agroecological composite element of meliorative adjustment of oxygen regime of arable soils is the possibility of the soils protection from loss of fertility potential, which are nitrates, and also iron oxides – the natural accumulators of oxygen in soil environment, protecting it from anoxia in conditions of waterlogging.

Keywords: soil oxygen regime, soil anoxia, oxidation-reduction potential, oxidation-reduction stability of soils, reduction of nitrates, soil drainage regime

Сферой обитания полевых культур и основным компонентом агроценозов являются почвы, которые представляют собой трехфазную систему, состоящую из:

- *твердой фазы*, состоящей из минерального и органического вещества;
- *жидкой фазы*, называемой почвенным раствором;
- *газовой фазы*, или почвенного воздуха, заполняющего свободные межагрегатные и пористые пространства в почве.

Более стабильной является твердая фаза, наиболее лабильной – газовая, в состав которой входит молекулярный кислород. Содержание газовой фазы зависит от пористости и степени увлажнения почвы (насыщения почвенным раствором).

Для характеристики кислородного состояния почв используют три определения [1]: нормоксия, гипоксия, аноксия. Используя эту трактовку, в данной публикации принято считать состояние нормоксии – при наличии молекулярного кислорода в почве (в почвенном воздухе и в растворе); гипоксии – при восстановлении кислородных соединений, находящихся в почвенном растворе, и аноксии – при восстановлении кислородных соединений минеральной части почвы. При этом наиболее выражен дефицит кислорода в состоянии аноксии.

В земледелии существует исторически сформулированный тезис, что излишек воды в почве является непосредственной причиной ограничения потенциала ее продуктивности. На этой основе параметризованы и построены дренажные системы в полеводстве. Следует отметить, что полевые растения можно альтернативно выращивать в водной среде (гидропоника), однако при условии ее соответствующего насыщения молекулярным кислородом. На основании этого можно сформулировать тезис, что растение гибнет не от излишка воды, а непосредственной причиной гибели является недостаток в ней растворенного молекулярного кислорода, которым путем диффузии снабжаются корни растений. Это наблюдение являлось причиной пересмотра парадигмы водной мелиорации, в особенности осушительного дренажа пахотных почв [2–5].

Существенную роль в формировании кислородного режима почв играют окислительно-восстановительные процессы [6–9]. Их изучение относительно механизма возникновения и агроэкологических последствий привело к формулированию нового подхода к мелиоративному регулированию водно-воздушного режима почв в полевых агроценозах [4–10].

При недостатке молекулярного кислорода в почвах происходят многочисленные окислительно-восстановительные реакции [9]. С сельскохозяйственной точки зрения важными из них и наиболее распространенными являются восстановление нитратов и оксидов трехвалентного железа [7, 11, 12], которые отрицательно влияют на урожайность полевых культур.

Цель работы – обоснование изменения парадигмы гидромелиорации в земледелии, учитывающей значимость формирования кислородного режима почв.

1. Условия потребления кислорода в агроценозах. Как известно, растения в процессе метаболизма используют пять компонентов природной среды :

- углекислый газ, поглощаемый из атмосферы в процессе фотосинтеза наземными органами растений;
- свет и солнечную энергию, необходимые для осуществления фотосинтеза;
- минеральные питательные вещества, усваиваемые из почвы или минерального удобрения;
- воду и кислород, извлекаемые из почвенной среды корневой системой.

Почвенный воздух и, как следствие, содержащийся в нем кислород, является наиболее лабильным (подвижным) компонентом трехфазной почвенной системы, зависящим от насыщения почвы водой (почвенным раствором). Так как корни растений и почвенная биота потребляют молекулярный кислород из почвенного раствора путем диффузии, то в случае полного затопления почвы водой доступным ресурсом молекулярного кислорода является его количество, растворенное в воде. При этом оно зависит от температуры воды и атмосферного давления [13], а также от степени насыщения почвы водой. При его исчерпании наступает кислородное голодание растений и ограничение окисления органического вещества. Почва из состояния нормоксии переходит в состояние кислородного дефицита (стадии гипоксии и аноксии).

В условиях Польши и Беларуси (Нечерноземная зона) минеральные пахотные почвы снабжаются водой главным образом за счет атмосферных осадков. Условия потребления кислорода агроценозами в этих условиях схематически представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Кислородное состояние почв в полевых агроценозах с учетом биологического водопотребления и испарения почвенной влаги

Table 1. Oxygen state of soils in field agroecosystems taking into account biological water consumption and soil moisture evaporation

Факторы перераспределения воды в агроценозе	Условия кислородного состояния почвы и его эффекты в почвенной среде
Атмосферное увлажнение	Вода осадков, насыщенная молекулярным кислородом, полностью поступает в почву (нет поверхностного стока), создавая оптимальный кислородный режим
Испарение	Испарению воды из почвы сопутствует уменьшение ресурсов кислорода, который освобождается из насыщенного раствора, сокращая запас молекулярного кислорода, используемого почвенной биотой и корнями
Транспирация	Потребление воды корнями растений превышает использование растворенного в ней кислорода, что нарушает равновесие и вызывает его удаление из почвенного раствора до газовой фазы почвы или атмосферы, не ограничивая его доступность растениям
	Сбалансированное потребление воды и растворенного в ней кислорода не дестабилизирует доступность этого газа и оптимальных условий дыхания корней и почвенной биоты
	Замедленное потребление воды по отношению к использованию растворенного в ней кислорода в условиях полной влагоемкости вызывает дефицит молекулярного кислорода, а в условиях насыщения полевой влагоемкости не нарушает оптимальных условий дыхания корней и почвенной биоты
Эвапотранспирация	Испарение и потребление воды корнями растений превышает использование кислорода, что обедняет его ресурсы в почвенной среде, но не нарушает оптимальных условий кислородного дыхания корней и почвенной биоты
	Испарение и потребление воды и растворенного в ней молекулярного кислорода сбалансированное, что не нарушает уравновешенной доступности этого газа и оптимальных условий кислородного дыхания корней растений и почвенной биоты
	Испарение и потребление воды замедленное по отношению к использованию растворенного в ней кислорода, что в условиях полной влагоемкости вызывает дефицит молекулярного кислорода, а в условиях насыщения полевой влагоемкости не нарушает оптимальных условий кислородного дыхания корней растений и почвенной биоты

2. Окислительно-восстановительный потенциал как показатель кислородного состояния почв. Протекающие в почве в условиях нормоксии реакции окисления (главным образом минерализация ее органического вещества) имеют необратимый характер. В условиях недостатка молекулярного кислорода в почвенной среде развиваются обратимые процессы кислородного обмена в виде окислительно-восстановительных реакций, которые происходят в так называемых парах редокс [9]. Им сопутствует изменение валентности окисленного элемента и энергетический эффект, называемый окислительно-восстановительным потенциалом E_h , выраженным в милливольтках. J. Gliński et al. [9] перечисляют целый ряд таких реакций. Но с агротехнической точки зрения самое большое значение имеют соединения NO_3^-/NO_2^- , Fe_2O_3/FeO , в которых в условиях восстановления происходит присоединение электронов и отдача кислорода, а при окислении наблюдается обратное явление. Интенсивность этих реакции зависит от температуры почвы

и глубины их протекания в почвенном профиле. Она уменьшается при понижении температуры почвы и в более глубоко расположенных ее горизонтах.

Известно, что в почве с беспрепятственным доступом к молекулярному кислороду величина равна $Eh \geq +600$ мВ. Подвергая почвы аноксии в лабораторных условиях при постоянной температуре замечено, что по мере ее повышения Eh понижается скачкообразно [9], останавливаясь при восстановлении нитратов на уровне около +400 мВ, а полутроаокислов железа на уровне около +300 мВ. Кроме того, установлено, что время удерживания Eh на определенном уровне зависит от температуры почвы, глубины взятия образца и генетических особенностей почв [7], включая натуральное содержание восстанавливаемых реагентов. Для восстановления нитратов и окислов трехвалентного железа такое поведение схематически иллюстрирует рис. 1.

На основе этой схемы и проведенных наблюдений выдвинут тезис, что показателем кислородного состояния почвы может быть определенная измерением потенциала Eh производная по времени окислительно-восстановительного процесса, которую можно считать свойством почвы, соответствующим ее окислительно-восстановительной устойчивости. Принято ее параметризовать продолжительностью времени t_{400} и t_{300} , в течение которого (после заливания почвы водой) происходит понижение потенциала Eh с +600 до +400 мВ (устойчивость почвы к возникновению гипоксии – восстановление нитратов) или до +300 мВ (устойчивость к возникновению аноксии – восстановление окислов железа).

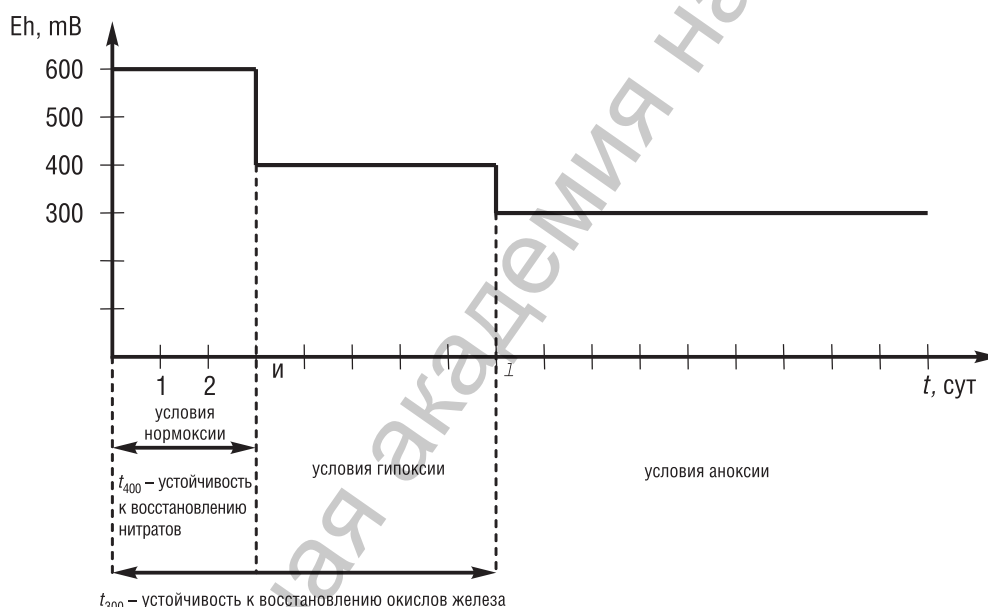


Рис. 1. Схематическое изображение скачкообразного характера изменения потенциала Eh в зависимости от содержания в почве молекулярного кислорода и окисляемых веществ

Fig. 1. Change of Eh potential depending on content of molecular oxygen and oxidizable substances in soil

Показатели t_{400} и t_{300} кроме доступности молекулярного кислорода имеют двойной смысл: аграрный – потеря определяющих урожайность нитратов и, соответственно, токсическое действие на растения двухвалентного железа, а также экологический – возможность эмиссии N_2O опасного парникового газа и обеднения ресурсов железа, являющегося в почве натуральным аккумулятором химически доступного кислорода.

3. Моделирование условий гидроокислительного состояния почв. Кислородный режим почв тесно связан с состоянием насыщения почвы водой, которая играет тройную роль в формировании кислородного состояния почв, являясь:

- аккумулятором растворенного в ней молекулярного кислорода;
- средой непосредственного его потребления (путем диффузии) корнями растений и микроорганизмами;
- наиболее активным регулятором газового обмена в пористой почвенной среде.

Факторами, обуславливающими циркуляцию воды в почве, являются главным образом капиллярные и гравитационные силы, а также сосущая сила корней растений. Максимальное количество воды, удерживаемое капиллярами, определяет полевая влажность почв (PPW), а полное насыщение почвы соответствует полной влагоемкости (CPW). Разница этих влагоемкостей составляет количество воды, стекающей из почвы под влиянием силы гравитации, которая главным образом определяет динамику газообмена и насыщения почвы кислородом. Капиллярная вода расходуется в процессе эвапотранспирации с участием растений или испарения, если почва не закрыта растительностью. В случае заполнения всех почвенных пор водой биопотребители располагают запасом молекулярного кислорода, содержащегося в почвенном растворе. После его расходования почвенная биота извлекает кислород, восстанавливая находящиеся в почве нитраты [14], при этом корни растений отмирают. После восстановления нитратов и продолжающимся дефиците молекулярного кислорода потенциал Eh понижается до +300 мВ, что соответствует восстановлению окислов трехвалентного железа. С агрономической точки зрения принято считать, что этот процесс определяет переход почвы в состояние аноксии [7, 15], а его морфологическим отражением является оглеение почвы, издавна принятое как показатель необходимости ее мелиоративного осушения [16].

Если добавляемая в почву вода из атмосферных осадков (P) насыщает ее актуальную (временную) влагоемкость (APW) до полевой влагоемкости (PPW), то почва находится в оптимальном кислородном состоянии. После заполнения осадками полной влагоемкости (CPW) и вытеснения из почвы воздуха кислородное состояние почвы зависит от соотношения времени освобождения от воды некапиллярных пор к времени использования молекулярного кислорода, находящегося в почвенном растворе. Если оно короче показателей t_{400} и t_{300} , то состояние нормоксии не прекращается, а если оно длиннее, то почва находится в состоянии гипоксии и аноксии. В случае, когда объем воды из осадков больше, чем нужно для заполнения CPW, на поверхности почвы появляется ее излишек (NW), который удлиняет сток гравитационной воды (WG) в глубь почвенного профиля, что надо принимать во внимание при оценке кислородного режима почв. Учитывая скачкообразное поведение потенциала Eh и вышепредставленные изложения, построена схематическая модель кислородного режима почвы (рис. 2).

Атмосферные осадки							
NW		NW		NW			
Почва							
P < (CPW – APW)		P = (CPW – APW)		P > (CPW – APW)			
NW = 0 T _{NW} = 0		NW = 0 T _{NW} = 0		NW > 0 T _{NW} > 0			
P < (PPW – APW) WG = 0	P > (PPW – APW) WG > 0		T _{PPW} > 0		(T _{NW} + T _{PPW}) > 0		
T _{PPW} = 0	T _{PPW} > 0		T _{PPW} > 1 $\frac{T_{PPW}}{t_{400}}$	T _{PPW} < 1 $\frac{T_{PPW}}{t_{400}}$	T _{NW} + T _{PPW} < 1 $\frac{T_{NW} + T_{PPW}}{t_{400}}$		
T _{PPW} = 0 $\frac{T_{PPW}}{t_{400}}$	T _{PPW} < 1 $\frac{T_{PPW}}{t_{400}}$	T _{PPW} > 1 $\frac{T_{PPW}}{t_{400}}$				T _{NW} + T _{PPW} > 1 $\frac{T_{NW} + T_{PPW}}{t_{400}}$	
		Условия гипоксии и восстановления нитратов				Условия гипоксии	
		T _{PPW} > 1 $\frac{T_{PPW}}{t_{300}}$					T _{PPW} > 1 $\frac{T_{PPW}}{t_{300}}$
Условия нормоксии, накопление нитратов и сохранение окислов трехвалентного железа		Условия аноксии и восстановление окислов трехвалентного железа		Условия нормоксии, накопление нитратов и сохранение трехвалентного железа			
				Условия аноксии			

Рис. 2. Модель гидроокислительных условий в почве

Условные обозначения: T_{NW} – время вертикального стока воды накопленной на поверхности почвы; T_{PPW} – время вертикального стока «гравитационной воды» (WG). Наименования остальных обозначений указаны в тексте

Fig. 2. Model of hydro-oxygen conditions in soil. Explanation of symbols: T_{NW} – time of water vertical runoff accumulated on soil surface; T_{PPW} – time of “gravity water” (WG) vertical runoff. Definitions of other symbols are indicated in the text

Приведенная на этом рисунке модель кислородного состояния почвы, связанная с вышепредставленными зависимостями, кроме атмосферных осадков определяет исключительно свойства почв, без учета таких факторов, как испарение или забор воды и кислорода корнями растений. Дополнительным условием является вертикальный сток излишка воды в условиях плоского рельефа.

Представленная в модели параметризация рассматриваемого явления не учитывает физической и химической неоднородности в почвенном профиле, обусловленной натуральной или искусственной (пахотный слой) агрегацией. Связанная с ней плотность и пористость дифференцирует местную насыщенность почвы кислородом. Это обуславливает возможность неравномерного поступления молекулярного кислорода внутрь плотных агрегатов и рыхлых межагрегатных пространств и одновременную нормоксию и аноксию отдельных фрагментов почвы.

Представленные обусловленности и эффекты кислородного состояния почв относятся к смещению трехфазной системы в сторону преобладания жидкой фазы над газовой, вызывающей ограничение доступности кислорода в почвенной среде. Однако в климатических условиях Нечерноземной зоны имеет также место смещение равновесия трехфазной системы в сторону ограничения жидкой фазы в продолжительные периоды без атмосферных осадков, вплоть до ограничения биологической функции почв. Для осуществления условий равновесия применяют мелиоративное обводнение. Комплексное отражение этого в кислородном режиме почв с учетом мелиоративных последствий представлено в виде упрощенной схемы (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Упрощенная схема кислородного режима почв и его корректировки мелиоративным путем

Table 2. Simplified scheme of soils oxygen mode and its correction using land reclamation method

Трехфазное состояние почвы	Eh	Содержание доступного кислорода в почве	Окислительно-восстановительные реакции в почве	Производительная способность почвы	Мелиоративная оптимизация кислородного режима почвы
Неуравновешенное – временная (актуальная) влагоемкость почвы ниже водных потребностей растений	+700 мВ +600 мВ	Ограниченное недостатком насыщенного кислородом почвенного раствора	Доминирование окислительных процессов минерализации органического вещества почвы	Ограниченная недостатком воды, доступностью кислорода и питательных элементов	Рекомендуемое орошение для поддержания жизнедеятельности растений и предотвращения деградации почвы
Уравновешенное – соответствующее полевой влагоемкости почвы		Оптимальное содержание кислорода в почвенном воздухе и растворе	Беспрепятственное аэробное дыхание корней и почвенных микроорганизмов	Оптимальная для данной почвы	Не нужна
Неуравновешенное – без нарушения твердой фазы, соответствующее полной влагоемкости почвы	+600 мВ +400 мВ	Продуктивный кислород только в почвенном растворе	Аэробное дыхание корней и почвенных микроорганизмов до истощения молекулярного кислорода в почвенном растворе	Оптимальная для данной почвы с тенденцией к ограничению	Допустимо осушение, улучшающее кислородный режим в почве
	+400 мВ +300 мВ	Непродуктивный кислород доступный из восстановления нитратов	Бескислородное дыхание корней, снабжение кислородом микроорганизмов путем восстановления нитратов	Ограниченная непродуктивным использованием нитратов	Рекомендуется осушение, предотвращающее потери азотных удобрений
Неуравновешенное – с повреждением твердой фазы, соответствующее полной влагоемкости почвы	<+300 мВ	Непродуктивный кислород из окислов железа	Отсутствие кислорода для дыхания корней, развитие восстановительных процессов анаэробными микроорганизмами	Ограниченная токсикацией почвенного раствора и отмиранием корней	Необходимо осушение, улучшающее газообмен в почве и предотвращающее ее деградацию

Несмотря на непродуктивные потери азотных удобрений в условиях гипоксии, с научной точки зрения следует отметить некоторые позитивные эффекты этого явления, которое параметризует показатель $(t_{300} - t_{400})$. Он определяет величину буферной способности, охраняющей почву от гидроокислительной деградации [4], выраженной деструкцией минерального компонента Fe_2O_3 , который в соответствии с обратной реакцией $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightleftharpoons \text{FeO}$ является существенным натуральным аккумулятором кислорода в почве. Несмотря на буферную роль нитратов в ограничении аноксии почв, применение их в виде «химической» мелиорации следует считать практически нерациональным приемом в связи с потерями энергии на их производство и высокую стоимость мероприятия.

4. Исследование окислительно-восстановительной устойчивости пахотных почв в Польше. В отличие от денитрификации восстановление окислов трехвалентного железа, определяемое как процесс оглеения, имеет отражение в морфологическом облике почв в виде изменения окраски, что является признаком идентификации дефицита молекулярного кислорода и практическим качественным показателем необходимости в их мелиоративном осушении [16]. Возможность перехода к количественным показателям устойчивости пахотных почв и восстановлению $(t_{400}$ и $t_{300})$, параметризующим время удаления дренажом излишка воды из переувлажненных почв, вызвала необходимость их определения в пахотных почвах Польши. Эту задачу решили совместными усилиями Институт агрофизики ПАН и Институт мелиорации и луговодства (в настоящее время переименованный на Институт технологических и естественных наук) в 1985–2005 гг.

С этой целью при участии почвоведов-мелиораторов из проектных бюро мелиорации, в соответствии с подготовленной методикой, были собраны почвенные образцы из 1000 почвенных профилей, характеризующих пахотные почвы Польши (3000 образцов с нарушенной структурой и 10 000 герметических цилиндров с ненарушенной структурой), для определения водно-физических свойств почв. Таким образом, в Институте агрофизики ПАН был создан банк почвенных образцов [17], необходимых для выполнения комплексных лабораторных исследований. Банк представляет собой совокупность статистически обоснованного количества почвенных образцов, отражающего пространственное участие 29 генерализованных почвенных единиц в структуре почвенного покрова пахотных угодий Польши в масштабе 1 : 2 500 000.

Параметризация t_{300} и t_{400} являлась пионерским мероприятием и потребовала особенной методической разработки [15]. Так как эти величины зависят от температуры и глубины почвы, принято ее характеризовать до глубины 100 см в пахотном, подпахотном и подпочвенном слоях при следующих температурах почвы: +4 °C, +10 °C, +15 °C, +20 °C, соответствующих характерным температурным условиям вегетации. Величину t_{300} при температуре почвы +20 °C (соответствующей условиям полной вегетации в течение летних месяцев) принято считать показателем начала аноксии пахотных почв [7].

Перед опытами, для того чтобы устранить влияние условий, связанных с естественным состоянием почвенных образцов, проведена их стандартизация, заключающаяся в просеивании воздушно-сухих почв через сито, размер ячейки $\varnothing = 1$ мм. После этого они были засыпаны (50 г) в отдельные герметические боксы, залиты водой в весовой пропорции 1 : 1 и подвержены инкубации в определенных температурных условиях с одновременным измерением динамики падения потенциала Eh, пока он не достиг +300 мВ, определяя для каждого образца величину t_{400} и t_{300} в сутках. Для пахотных почв в целом и для отдельных почвенных выделов определены характерные диапазоны t_{400} и t_{300} с возможностью их использования для картографических целей. Прежде всего, их подвергли компьютерной картографической обработке для представления в Атласе окислительно-восстановительных свойств пахотных почв Польши [14].

В дальнейшем определяли гидрофизические свойства почв, используя аппарат Рихардса и образцы с ненарушенной структурой. В результате для отдельных почвенных разностей получены характерные величины CPW, PPW, коэффициенты фильтрации и другие показатели [18].

Впоследствии параметры t_{300} , CPW, PPW и коэффициент фильтрации были использованы для определения чувствительности почв к гидроокислительной деградации (D_{h0}), являющейся количественным критерием оценки потребности в дренаже пахотных почв в случае, когда $D_{h0} < 1$. Величину D_{h0} вычисляется по формуле $D_{h0} = t_{300} / T_{PPW}$ [4], где T_{PPW} – время освобождения от воды некапиллярных пор.

На основе вышеприведенных параметров для отдельных почвенных разностей рассчитаны потенциальные величины критических осадков (P_k), создающих в них условия аноكсии [10] при заполнении водой РРВ. Для ознакомления читателя с полученными результатами их примерные показатели приведены в табл. 3.

Картографическое изображение пространственного распределения полученных параметров на фоне структуры почвенного покрова пахотных земель в масштабе 1 : 2 500 000 представлено в следующих публикациях:

- t_{400} и t_{300} в Атласе осислительно-восстановительных свойств пахотных почв Польши [14];
- СРВ, РРВ в монографии характеризующей гидрофизические свойства пахотных почв Польши [18];
- D_{h0} в научной статье [4];
- P_k в монографии, характеризующей влияние осадков на кислородный режим пахотных почв Польши [10].

Многосторонний подход и многочисленные результаты проведенных исследований, изложенные в статье, дают возможность автору утверждать о необходимости совершенствования научных основ охраны пахотных почв от гидроокислительной деградации.

Т а б л и ц а 3. Окислительно-восстановительные и гидрофизические показатели избранных пахотных почв Польши

Table 3. Oxidation and restoration, and hydrophysical indicators of selected arable soils in Poland

Пахотные почвы	Слой почвы	Усредненные величины показателей						
		Сутки при температуре почвы +20 °C			D_{h0}	СРВ, мм	РРВ, мм	P_k , мм
		t_{400}	t_{300}	T_{PPW}				
Лессовые черноземы	Пахотный	<1	0,5	3,0	0,17	157,5	97,5	10,0
	Подпахотный	<1	1,0	3,5	0,28	105,0	65,0	11,4
	Подпочвенный	<1	1,0	5,0	0,20	212,5	162,5	10,0
Лессовидные бурые и элювированные почвы	Пахотный	<1	1,5	3,5	0,43	106,3	68,8	17,4
	Подпахотный	<1	1,0	5,0	0,20	106,3	56,3	6,9
	Подпочвенный	<1	3,0	5,5	0,54	187,5	87,5	13,6
Темноцветные дерновые почвы	Пахотный	<1	1,5	2,5	0,60	114,8	74,3	24,3
	Подпахотный	<1	3,0	4,0	0,75	86,3	63,3	17,3
	Подпочвенный	<1	3,0	5,0	0,60	187,5	137,5	30,0
Тяжелосуглистые аллювиальные почвы	Пахотный	<1	1,5	2,5	0,60	106,3	93,8	7,5
	Подпахотный	<1	3,0	4,0	0,75	118,8	93,8	18,8
	Подпочвенный	<1	6,0	4,5	1,33	237,5	187,5	66,7
Пылеватосуглистые поверхностно-оглеенные почвы	Пахотный	<1	1,5	4,5	0,33	106,3	81,3	8,3
	Подпахотный	<1,5	5,0	5,5	0,91	93,8	68,8	22,7
	Подпочвенный	<1,5	6,0	5,5	1,09	212,5	137,5	81,8
Песчаносуглистые поверхностно-оглеенные почвы	Пахотный	<1	4,5	2,5	1,80	93,8	56,3	67,5
	Подпахотный	1,0	9,0	7,5	1,20	93,8	43,8	60,0
	Подпочвенный	3,0	6,0	8,0	0,75	187,5	112,5	56,3
Легкосуглистые бурые почвы	Пахотный	1,0	4,5	3,0	1,50	93,8	56,3	52,5
	Подпахотный	3,0	9,0	5,0	1,80	93,8	43,8	41,7
	Подпочвенный	5,0	12,0	6,5	1,85	162,5	137,5	133,3

Выводы

1. Представленные результаты исследований подтверждают целесообразность дальнейшего углубления знаний относительно агроэкологического значения кислородного режима пахотных почв и его мелиоративной корректировки.

2. Приведенные параметры окислительно-восстановительной устойчивости пахотных почв и их подверженности гидроокисной деградации создают основу для дальнейшего совершенствования параметризации и калибровки кислородного состояния пахотных почв с промывным водным режимом.

3. Учет поведения нитратов в условиях кислородного дефицита необходим с целью сокращения потерь азота и поддержания высокого плодородия пахотных почв.

4. Представленные модели гидроокислительного режима почв являются предпосылкой для модификации парадигмы осушительной мелиорации, в которой непосредственная причина ограничения жизнедеятельности растений и почвенной биоты заключается в недостатке молекулярного кислорода, а не в избытке воды в почве.

Список использованных источников

1. Oxygenology in outline / W. Stępniewski [et al.]. – Lublin : Inst. of Agrophysics of the Pol. Acad. of Sciences, 2005. – 121 p.
2. Gliński, J. Pobieranie tlenu i wydzielanie dwutlenku węgla w środowisku glebowym / J. Gliński, W. Stępniewski, S. Łabuda. – Wrocław : Zakł. Nar. im. Ossolińskich, 1983. – 72 s. – (Problemy Agrofizyki ; N 39).
3. Znaczenie warunków tlenowych w programach melioracyjnych / J. Gliński [et al.] // Problemy agrofizyki / Pol. Akad. Nauk, Inst. Agrofizyki. – Wrocław, 1992. – N 67. – S. 65–84.
4. Ostrowski, J. Ocena i kartograficzna prezentacja wrażliwości gleb ornych na hydrooksygeniczną degradację / J. Ostrowski, C. Sławiński, R. Walczak // Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie / Inst. Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach. – Falenty, 2004. – T. 4, z. 2a. – S. 185–200.
5. Ostrowski, J. Glebowo-wodne uwarunkowania i bilansowanie przestrzennych potrzeb melioracji gruntów ornych z zastosowaniem techniki komputerowej = Soil and water determinants and balancing spatial requirements for arable land reclamation with the use of computer technique / J. Ostrowski ; Inst. Technologiczno-Przyrodniczy. – Falenty : Wydaw. ITP, 2016. – 173 s. – (Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. Rozprawy naukowe i monografie ; N 42).
6. Кауричев, И. С. Типы окислительно-восстановительного режима почв / И. С. Кауричев // Почвоведение. – 1979. – № 3. – С. 35–45.
7. Stępniewska, Z. Właściwości oksydoredukcyjne gleb ornych Polski / Z. Stępniewska // Problemy Agrofizyki. – 1988. – N 56. – 124 c.
8. Агрономическая оценка окислительно-восстановительного состояния почв / В. И. Савич [и др.] // Почвоведение. – 2004. – № 6. – С. 702–712.
9. Oxydation-reduction (redox) properties of soils / J. Gliński [et al.]. – Lublin : Pol. Acad. of Sciences Press, Branch in Lublin, 2012. – 127 p.
10. Ostrowski, J. Nadmiary wody opadowej i niedotlenienie gleb ornych Polski = Excess rainwater and hypoxia of arable soils in Poland / J. Ostrowski, L. Łabędzki ; Inst. Technologiczno-Przyrodniczy. – Falenty : Wydaw. ITP, 2016. – 121 s. – (Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. Rozprawy naukowe i monografie ; N 43).
11. Denitrification rate in soils as affected by their redox potential / Z. Stępniewska [et al.] // J. of Water a. Land Development. – 2000. – N 4. – P. 163–173.
12. Островски, Я. Поведение нитратов в условиях временного переувлажнения, нарушающего кислородный режим минеральных пахотных почв Польши / Я. Островски // Системы интенсификации земледелия и биотехнологии как основа инновационной модернизации аграрного производства / Владимир. науч.-исслед. ин-т сел. хоз-ва ; редкол. : Л. И. Ильин [и др.]. – Суздаль, 2016. – С. 143–155.
13. Ревут, И. Б. Физика почв / И. Б. Ревут. – Л. : Колос, 1964. – 319 с.
14. Atlas oksydoredukcyjnych właściwości gleb ornych Polski / Z. Stępniewska [et al.] ; Inst. Agrofizyki Pol. Akad. Nauk w Lublinie, Inst. Melioracji i Użytków Zielonych. – Lublin ; Falenty : IA PAN, IMUZ, 1997. – 11 s.
15. Gliński, J. Wskaźnik odporności gleb na redukcję / J. Gliński, Z. Stępniewska // Zeszyty problemowe postępów nauk rolniczych / Pol. Akad. Nauk, Wyd. Nauk Rol., Lesnych i Weterynaryjnych. – Warszawa, 1986. – Z. 315 : Agrofizyczne właściwości środowiska glebowego. – S. 81–94.
16. Ostrowski, J. Badania i ocena warunków glebowo-przyrodniczych dla potrzeb melioracji gruntów ornych / J. Ostrowski // Biblioteczka “Wiadom. IMUZ” / Inst. Melioracji i Użytków Zielonych. – Falenty, 1976. – N 52. – S. 55–124.
17. Bank próbek glebowych reprezentujących gleby mineralne Polski / J. Gliński [et al.]. – Wrocław : Zakł. Nar. im. Ossolińskich, 1991. – 61 s. – (Problemy Agrofizyki ; N 66).
18. Hydrophysical Characteristics of Mineral Arable Soil of Poland / R. Walczak [et al.] // Acta Agrophysica. – 2002. – N 79. – S. 1–64.

References

1. Stępniewski W., Stępniewska Z., Bennicelli R.P., Gliński J. *Oxygenology in outline*. Lublin, Institute of Agrophysics of the Polish Academy of Sciences, 2005. – 121 p.
2. Gliński J., Stępniewski W., Łabuda S. *Pobieranie tlenu i wydzielanie dwutlenku węgla w środowisku glebowym*. Wrocław, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, 1983. 72 p.

3. Gliński J., Stępniewska Z., Stępniewski W., Ostrowski J. Znaczenie warunków tlenowych w programach melioracyjnych. *Problemy Agrofizyki*. Wrocław, 1992, N 67, pp. 65–84.
4. Ostrowski J., Sławiński C., Walczak R. Ocena i kartograficzna prezentacja wrażliwości gleb ornych na hydrooksygeniczną degradację. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. Falenty, 2004, vol. 4, N 2a, pp. 185–200.
5. Ostrowski J. *Glebowo-wodne uwarunkowania i bilansowanie przestrzennych potrzeb melioracji gruntów ornych z zastosowaniem techniki komputerowej*. Falenty, Wydawnictwo ITP, 2016. 173 p.
6. Kaurichev I.S. *Tipy okislitel'no-vosstanovitel'nogo rezhima pochv* [Types of redox regime of soils]. *Pochvovedenie* [Soil Science], 1979, no. 3, pp. 35–45. (In Russian).
7. Stępniewska, Z. Właściwości oksydoredukcyjne gleb ornych Polski / Z. Stępniewska // *Problemy Agrofizyki*. – 1988. – N 56. – 124 c.
8. Savich V.I., Kaurichev I.S., Shishov L.L., Nikol'skiy Yu.N., Romanchik E.A. *Agronomicheskaya otsenka okislitel'no-vosstanovitel'nogo sostoyaniya pochv* [Agronomical assessment of the oxidation-reduction state of soils]. *Pochvovedenie* [Soil Science], 2004, no. 6, pp. 702–712. (In Russian).
9. Gliński J., Stępniewska Z., Stępniewski W., Banach A. *Oxydation-reduction (redox) properties of soils*. Lublin, Polish Academy of Sciences Press, Branch in Lublin, 2012. 127 p.
10. Ostrowski J., Łabędzki L. *Nadmiary wody opadowej i niedotlenienie gleb ornych Polski*. Falenty, Wydawnictwo ITP, 2016. 121 p.
11. Stępniewska Z., Bennicelli R.P., Weiss U., Włodarczyk T., Stahr K. Denitrification rate in soils as affected by their redox potential. *Journal of Water and Land Development*, 2000, no. 4, pp. 163–173.
12. Ostrowski J. *Povedenie nitratov v usloviyakh vremennogo pereuvlazhneniya, narushayushchego kislorodnyy rezhim mineral'nykh pakhotnykh pochv Pol'shi* [The behavior of nitrates in conditions of temporary waterlogging, which disturbs the oxygen regime of Poland's mineral soils]. *Sistemy intensifikatsii zemledeliya i biotekhnologii kak osnova innovatsionnoy modernizatsii agrarnogo proizvodstva* [Systems of intensification of agriculture and biotechnology as a basis for innovative modernization of agricultural production]. Suzdal, 2016, pp. 143–155. (In Russian).
13. Revut I.B. *Fizika pochv* [Physics of soils]. Leningrad, Kolos Publ., 1964. 319 p. (In Russian).
14. Stępniewska Z., Stępniewski W., Gliński J., Ostrowski J. *Atlas oksydoredukcyjnych właściwości gleb ornych Polski*. Lublin, Falenty, IA PAN, IMUZ, 1997. 11 p.
15. Gliński J., Stępniewska Z. Wskaźnik odporności gleb na redukcję. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. Warszawa, 1986, no. 315, pp. 81–94.
16. Ostrowski J. Badania i ocena warunków glebowo-przyrodniczych dla potrzeb melioracji gruntów ornych. *Biblioteczka "Wiadomości IMUZ"*. Falenty, 1976, no. 52, pp. 55–124.
17. Gliński J., Ostrowski J., Stępniewska Z., Stępniewski W. *Bank próbek glebowych reprezentujących gleby mineralne Polski*. Wrocław, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, 1991. 61 p.
18. Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C. Hydrofizyczne charakterystyki mineralnych gleb ornych Polski. *Acta Agrophysica*, 2002, no. 79, pp. 1–64.

Информация об авторе

Януш Островский – докт. с.-х. наук, проф., Институт технологических и естественных наук Фаленты (аллея Храбска, 3, 05-090 Рашин, Польша). E-mail : j.ostrowski@itp.edu.pl

Information about author

Ostrowski Janusz – D.Sc. (Agricultural), Professor. Institute of Technology and Life Science Falenty (3 Hrabaska Al., 05-090 Raszyn, Poland). E-mail : j.ostrowski@itp.edu.pl

Для цитирования

Островский, Я. Агроэкологические аспекты кислородного состояния минеральных пахотных почв в условиях атмосферного увлажнения / Я. Островский // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2017. – № 3. – С. 50–59.

For citation

Ostrowski Y. Agroecological aspects of oxygen state of mineral arable soils in conditions of atmospheric humidification. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series], 2017, no 3, pp. 50–59.