

## АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА ПАХОТНЫХ ПОЧВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДНОЙ МЕЛИОРАЦИИ В ПОЛЬШЕ

**Януш Островски**, доктор технических наук

Природно-Технологический Институт,  
г. Фаленты, Польша

**Ключевые слова:** водная мелиорация почв, кислородный режим почв, окислительно-восстановительные свойства почв, аноксия почв.

### Введение

В Польше около 70 % территории занимают сельскохозяйственные угодья. В условиях умеренного климата обеспечение сельскохозяйственных культур водой происходит в основном за счет атмосферных осадков и водоудерживающей способности почв. Накапливаемые излишки влаги пополняют ресурсы подземных и поверхностных вод. Переувлажнение почв в бессточных понижениях и речных долинах приводит к заболачиванию территории, что способствует формированию натуральных экосистем с гидрофильной растительностью. Основной причиной осваивания переувлажненных и заболоченных почв стала необходимость в постоянном расширении сельскохозяйственных угодий. Мелиоративное осушение минеральных переувлажненных почв способствовало расширению посевной площади, а мелиорация торфяников и заболоченных земель – культурных лугов и пастбищ. Первоначальная цель мелиорации заключалась в освоении заболоченных местностей и поддержании водно-воздушного режима почв.

В 19 веке в Польше велись широкомасштабные работы по осушительной мелиорации. До 1914 года в центральных и восточных районах мелиоративные работы были проведены на 10 тыс. га лугопастбищных угодий, дренаж пашни был выполнен на 100 тыс. га, кроме того было построено несколько тысяч рыбных прудов. В период с 1920 по 1939 гг. площадь мелиорированных сельхозугодий увеличилась до 200 тыс. га, а общая длина открытой осушительной сети достигла 20 тыс. км [12]. Подготовка соответствующего технико-строительного потенциала и направление необходимых бюджетных средств на реализацию мелиоративных программ привели к тому, что в конце XX века площадь дренированных пахотных земель составляла около 4,7 млн. га, а осушенных лугопастбищных угодий – почти 2,0 млн. га [13].

Однако проведение крупномасштабных мелиоративных мероприятий может негативно сказываться на экологическом состоянии почвенной среды. Данное обстоятельство обусловило необходимость проведения анализа создавшейся обстановки и разработки

нового подхода к оценке целесообразности мелиоративных мероприятий и параметризации дренажных систем.

В данной статье в хронологическом порядке изложены этапы исследований польских почвоведов по изучению окислительно-восстановительных процессов в пахотных почвах и состояния полевых агроценозов при создании и параметризации мелиоративной диагностики этих почв на основе новой парадигмы водной мелиорации с учетом агроэкологического подхода.

На первоначальном этапе проводилась диагностика уровня грунтовых вод, указывающего на наличие переувлажнения почвы. Было установлено, что после осушения заболоченных территорий дальнейшему повышению производительности суходольных земель, особенно в местах ледниковых наносов, препятствует переувлажнение, причиной которого является ограниченный вертикальный сток талой и дождевой воды с верхних слоев почв. При этом в центральных районах Польши поля испытывают дефицит влаги [10, 11, 17], а проведение искусственного орошения является экономически оправданным только при возделыванию плодовых и овощных культур.

Принцип мелиоративной диагностики переувлажненных земель должен базироваться на изучении морфологических признаков почв, формирующихся в почвенных профилях под воздействием окислительно-восстановительных процессов. Еще более 100 лет назад к такому выводу пришли известные почвоведы Г.Н.Высоцкий [32], В.Л. Кубена [9], Е. Микенхаузен [14], И.С. Кауричев [34] и другие. В начале XXI века Ф.Р. Зайдельман [33] попытался подытожить результаты исследований по морфоглеегенезису. Однако ознакомиться с работами польских почвоведов касательно данного вопроса он не мог, поскольку все публикации были на польском языке.

#### **Оценка окислительно-восстановительного состояния почв**

Современные технологии возделывания растений тесно связаны с механической обработкой почвы, требующей соответствующего её физического состояния. В значительной мере оно зависит от содержания воды в почве. Как известно, излишки воды вызывают повышение пластичности почвы, что препятствует механической её обработке и сбору урожая. Следовательно, при наличии переувлажнения почвы пахотных и лугопастбищных угодий необходимо проводить мелиоративные работы. Более углубленные исследования показали, что для оптимального развития возделываемых культур необходимо не только определенное количество воды в почве, но и соответствующая пропорция между содержанием воды и почвенного воздуха, являющегося источником молекулярного кислорода, необходимого для корневого питания растений и почвенной биоты. Эти наблюдения обратили внимание почвоведов на необходимость изучения водно-воздушного режима почв и особенно его химических аспектов. В Польше систематические исследования в этой области, начиная с половины XX века, проводил Я. Сjuta [21] в Пулавском институте почвоведения (IUNG).

В этих исследованиях выявлена тесная связь между морфологическим обликом профиля почвы и динамикой её увлажнения. Изучая причины этой связи, Я. Сюта сформировал системный подход к исследованиям окислительно-восстановительных процессов, направленный прежде всего на преобразование соединений железа, в зависимости от содержания в почве молекулярного кислорода и использования этого явления для диагностики условий и оценки водно-воздушного режима почв. Через 50 лет Ф.Р. Зайдельман присвоил совокупности почвенных окислительно-восстановительных процессов название «морфоглеегенезиса» [33].

Изменение валентности железа в условиях недостатка кислорода, вытесняемого вместе с почвенным воздухом избытком воды в почве, вызывает при соучастии активного органического компонента почвы образование растворимых окислов двухвалентного железа, которые перемещаются в почвенном профиле вплоть до поступления в грунтовые воды. Последовательный приток кислорода в освобожденную от избытка влаги почву вызывает повторное образование полуторных окислов железа, которые, выпадая из почвенного раствора, стабилизируются в различных формах в разных частях почвенного профиля.

На основе этого тезиса Я. Сюта вместе со своими сотрудниками в середине 60-тых годов XX века проводил оригинальные опыты. В стеклянные колонны наливалась чистая лёссовая порода желтого цвета, в которую добавлялась дистиллированная вода. После продолжительного промежутка времени порода оставалась однородной. Однако даже при недолгом контакте с органическим веществом (чайной заваркой) на лёссовой породе появлялись зеленовато-синие пятна. После оттока гравитационной воды эти пятна приобретали желтовато-охристый цвет окислов трехвалентного железа. На основе этих наблюдений пришли к выводу, что окислительно-восстановительные процессы возможны только в условиях проникновения биосферы в геосферу и создания педосферы как биокосной системы [31]. Дополнительно Я. Сюта определил, что насыщенность цвета глеевых пятен зависит от кислотности (pH) почвы, чем выше pH, тем насыщеннее голубой оттенок [23].

Модифицируя свои опыты путем применения различных способов увлажнения и осушения лёссовых пород в колоннах, он получал различные формы оглеения и железистых образований. После этих опытов Я. Сюта подбирал соответствующие аналоги в полевых условиях, привязывая их к особенностям водного режима почв и почвообразующих пород. Результатом исследований явились классификации форм оглеения и железистых новообразований как морфологических признаков и свидетелей гидрохимической эволюции почв [21, 22]. Выделялись следующие формы оглеения: сплошное (от воздействия уровня грунтовых вод – собственно глеевый горизонт), зональное (от стагнации воды в верхней части почвенного профиля – особенно при двучленных, песчано-суглинистых отложениях), мраморовидное, потёчное, пятнистое (от временного, местного переувлажнения почвы). Интересно, что сходные формы оглеения и аналогичные причины их воз-

никновения изложил в своей работе Ф.Р.Зайдельман [33] (потёчное оглеение по А. Сютя соответствует струйчатому по Ф.Зайдельману).

Классификация восстановленных и окисленных форм железа в зависимости от условий их образования являлась основой для разработки критериев оценки водного режима минеральных почв, а впоследствии также и потребностей в осушении пахотных земель [15]. Разработанный автором метод балльной оценки потребностей осушения пахотных почв изложен подробно в статье, опубликованной в журнале «Почвоведение» Данная таблица отражает сущность «морфологического» метода оценки (табл. 1) [35].

**Таблица 1. Параметризация оценки потребностей в осушении пахотных почв**

| Механический состав *                                                                                                                                                                                                                                                               | Толщина слоев | гравий; рыхлый и связанный песок |        |       | рыхлая и связанная супесь |        |       | гравий глинистый |        |       | легкий суглинок, пылистое образование, лёсс |        |       | средний суглинок, пылевато-илистое образование |        |       | тяжелый суглинок, ил |        |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------|--------|-------|---------------------------|--------|-------|------------------|--------|-------|---------------------------------------------|--------|-------|------------------------------------------------|--------|-------|----------------------|--------|-------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                     |               | 25-60                            | 60-120 | > 120 | 25-60                     | 60-120 | > 120 | 25-60            | 60-120 | > 120 | 25-60                                       | 60-120 | > 120 | 25-60                                          | 60-120 | > 120 | 25-60                | 60-120 | > 120 |
| гравий; рыхлый и связанный песок                                                                                                                                                                                                                                                    | 25-60         |                                  |        |       | 3                         |        |       | 6                |        |       | 9                                           |        |       | 11                                             |        |       | 14                   |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 60-120        |                                  |        |       |                           | 2      |       |                  | 4      |       |                                             | 6      |       |                                                | 8      |       |                      | 11     |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                     | > 120         |                                  |        | 0     |                           |        | 1     |                  |        | 2     |                                             |        | 3     |                                                |        | 5     |                      |        | 8     |
| рыхлая и связанная супесь                                                                                                                                                                                                                                                           | 25-60         | 0                                |        |       |                           |        |       | 7                |        |       | 10                                          |        |       | 12                                             |        |       | 15                   |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 60-120        |                                  | 4      |       |                           |        |       |                  | 6      |       |                                             | 8      |       |                                                | 10     |       |                      | 13     |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                     | > 120         |                                  |        | 2     |                           |        | 4     |                  |        | 5     |                                             |        | 6     |                                                |        | 8     |                      |        | 11    |
| гравий глинистый                                                                                                                                                                                                                                                                    | 25-60         | 1                                |        |       | 5                         |        |       |                  |        |       | 11                                          |        |       | 14                                             |        |       | 16                   |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 60-120        |                                  | 3      |       |                           | 6      |       |                  |        |       |                                             | 10     |       |                                                | 12     |       |                      | 14     |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                     | > 120         |                                  |        | 5     |                           |        | 7     |                  |        | 8     |                                             |        | 9     |                                                |        | 10    |                      |        | 12    |
| легкий суглинок, пылистое образование, лёсс                                                                                                                                                                                                                                         | 25-60         | 2                                |        |       | 6                         |        |       | 9                |        |       |                                             |        |       | 15                                             |        |       | 18                   |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 60-120        |                                  | 4      |       |                           | 7      |       |                  | 10     |       |                                             |        |       |                                                | 14     |       |                      | 16     |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                     | > 120         |                                  |        | 6     |                           |        | 8     |                  |        | 11    |                                             |        | 12    |                                                |        | 13    |                      |        | 14    |
| средний суглинок, пылевато-илистое образование                                                                                                                                                                                                                                      | 25-60         | 3                                |        |       | 8                         |        |       | 10               |        |       | 13                                          |        |       |                                                |        |       | 19                   |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 60-120        |                                  | 6      |       |                           | 10     |       |                  | 12     |       |                                             | 14     |       |                                                |        |       |                      | 18     |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                     | > 120         |                                  |        | 9     |                           |        | 12    |                  |        | 14    |                                             |        | 15    |                                                |        | 16    |                      |        | 17    |
| тяжелый суглинок, ил                                                                                                                                                                                                                                                                | 25-60         | 4                                |        |       | 9                         |        |       | 11               |        |       | 15                                          |        |       | 16                                             |        |       |                      |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 60-120        |                                  | 7      |       |                           | 11     |       |                  | 13     |       |                                             | 16     |       |                                                | 17     |       |                      |        |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                     | > 120         |                                  |        | 11    |                           |        | 13    |                  |        | 15    |                                             |        | 17    |                                                |        | 18    |                      |        | 20    |
| *В случае пылеватости материнской или подстилающей породы высчитывали один балл; в случае трехчленных профилей, если подстилающая порода имеет более тяжелый механический состав, по сравнению с материнской породой, прибавляют, а в противоположном случае высчитывают один балл. |               |                                  |        |       |                           |        |       |                  |        |       |                                             |        |       |                                                |        |       |                      |        |       |

**А. Расположение разреза (в рельефе местности)**

вершина, крутой  
и средний склон – 0  
слабый склон – 0(1)  
равнина – хороший сток – 1  
равнина – слабый сток – 3  
ложбина – 6  
бессточная впадина – 10

*В равнинном рельефе слабый склон  
оценивают одним баллом.*

**В. Типы почвы:**

рендзины, черноземы – 0  
бурые почвы – 1  
бурые алювиальные почвы – 2  
подзолистые (псевдоподзо-листые)  
почвы – 4  
темноцветные почвы – 5  
темноцветные алювиальные почвы – 5  
глеевые почвы – 8

**С. Механический состав****Д. pH и карбонаты**

>6,5 (CaCO<sub>3</sub>) – 0  
6,5 – 5,0 – 1  
<5,0 – 3

| № разреза | символ почвенной разности | баллы оценок диагностических признаков |   |    |   |   |                |                |                |    | общее кол-во баллов | символ оценки |
|-----------|---------------------------|----------------------------------------|---|----|---|---|----------------|----------------|----------------|----|---------------------|---------------|
|           |                           | A                                      | B | C  | D | E | F <sub>1</sub> | F <sub>2</sub> | F <sub>3</sub> | G  |                     |               |
| 1         | 2                         | 3                                      | 4 | 5  | 6 | 7 | 8              | 9              | 10             | 11 | 12                  | 13            |
| 1         | D pgm 40 gl**             | 3                                      | 5 | 10 | 1 | 2 | 0              | 5              | 8              | 4  | 38                  | □             |

**\*\* темноцветная дерновая почва – связная смесь от 40 см легкий суглинок**

| Определение потребностей                   | количество баллов | Символ |
|--------------------------------------------|-------------------|--------|
| почвы, не нуждающиеся в осушении           | 1-23              | О      |
| почвы, нуждающиеся в осушении              | 24-37             | Δ      |
| почвы, сильно нуждающиеся в осушении       | 38-52             | □      |
| почвы, нуждающиеся в максимальном осушении | 53-75             | ú      |

**Е. Формы железистых новообразований:**

отсутствие – 0  
стяжения (пятна, потеки, полосы, оболочки) – 1  
мелкие конкреции (бобовинки, горшки) – 2  
трубки рудяки – 3

**Ф. Формы оглеения:**

отсутствие – 0  
пятнистое, потечное – 1  
мраморовидное – 2  
зональное – 5  
**полное оценивается в отдельных слоях:**  
0 – 50 см = F<sub>1</sub>  
50 – 100 см = F<sub>2</sub>  
100 – 150 см = F<sub>3</sub>

**Г. Категории водного режима:**

засушливость, оптимальное увлажнение – 0  
временное переувлажнение – 2  
временная подмоклость – 4  
постоянная подмоклость – 7

С её помощью почвовед-мелиоратор после стандартного описания почвенного разреза имел возможность однозначно оценить исследуемую почву относительно её потребности в дренаже. Несмотря на качественный характер оценки, её практическая сущность доказана применением в проектировании закрытого дренажа пахотных почв на площади около 1,5-2,0 млн. га. До настоящего времени практическое применение этого метода при проектировании дренажных систем формально не отменено. Построенные на этой основе дренажные системы должны предотвращать уменьшение содержания железа в почве.

#### **Новая парадигма водной мелиорации с учетом кислородного состояния агроценозов**

Параллельно с внедрением выше представленного метода мелиоративной оценки пахотных почв, в связи с его качественными основами, были развернуты исследования, направленные на поиски количественных параметров оценки водно-воздушного режима почв. В 70-80 годах прошлого века в Институте агрофизики РАН [1, 6, 8, 26] были проведены работы по изучению кислородного режима почв, базирующиеся на изучении способности увлажненной почвы обеспечивать кислородом корневое питание (дыхание) растений и развитие почвенной биоты. Корни и микроорганизмы извлекают путем диффузии кислород из почвенного раствора, а его содержание в этом растворе пополняется из воздуха, заполняющего часть почвенных пор. Если вода полностью вытеснит этот воздух, а запас кислорода в почвенном растворе будет исчерпан, тогда корни подвергнутся стрессу, который (при продолжительном недостатке кислорода) может привести к их отмиранию [20, 27]. Количественный показатель доступности кислорода в почвенной среде выражен расходом диффузии кислорода (ODR), измеряемым в  $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Проведенные исследования показали, что у большинства сельскохозяйственных культур оптимальное потребление корнями кислорода достигается при его расходе свыше  $70 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Однако попытки применения этого параметра для мелиоративной оценки почв [7] не нашли практического применения главным образом из-за его лабильности. Несмотря на это, проведенные исследования выявили необходимость в совершенно новом подходе к определению функции водной мелиорации в формировании свойств и состояния почвенной среды, заключающихся в оптимизации окислительно-восстановительного состояния почв. Параметром, отражающим это состояние, является широко известный окислительно-восстановительный потенциал  $E_h$ .

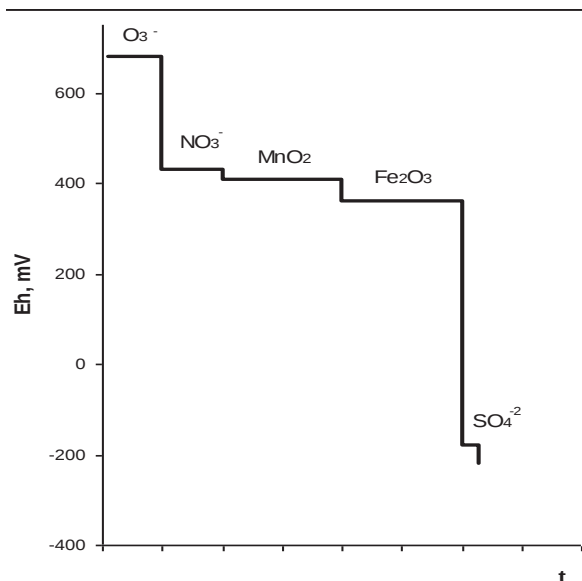
Расширенные и усовершенствованные исследования динамики содержания молекулярного кислорода в почвах показали, что его запасы при полном затоплении почвы водой не одинаковы. Почвы обладают также различной динамикой использования этих запасов. Данному процессу сопутствуют изменения окислительно-восстановительного потенциала.

Известно, что отдельным химическим окислительно-восстановительным реакциям присущая определенная величина  $E_h$ . С точки зрения функционирования почвенной сре-

ды особенный интерес представляет параметризация восстановления окислов марганца, а в особенности железа, так как изменение их валентности вызывает морфологические эффекты, диагностирующие качественную мелиоративную оценку почв [35].

Уже в первой фазе исследований было установлено, что потенциал Eh более стабилен по сравнению с ODR, хотя и связан с временным состоянием увлажнения почвы. Его величина уменьшается по мере использования запасов молекулярного кислорода в почве. Таким образом, можно считать, что этот потенциал является индикатором кислородного состояния почвы. Известно, что в почве с беспрепятственным доступом к молекулярному кислороду, потенциал Eh превышает 600 мВ. При аноксии почвы в лабораторных условиях по мере ее увеличения Eh изменялся скачкообразно[5], задерживаясь на некоторое время на уровне около +400 мВ, +350 мВ и +300 мВ. Такое поведение соответствует реакциям восстановления нитратов, окислов марганца и железа при участии почвенной биоты. Дополнительно установлено, что уровень Eh зависит от температуры почвы, глубины взятого образца и генетических особенностей почв [24], включая натуральное содержание восстанавливаемых реагентов. Такое поведение потенциала Eh схематически иллюстрирует рис.1.

**Рисунок 1 – Изменение потенциала Eh в условиях продолжительной аноксии почвы**



К свойствам почвы можно отнести скорость прохождения в ней окислительно-восстановительного процесса (окислительно-восстановительная устойчивость). С учетом данного показателя можно делать вывод о необходимости проведения дренажа и мелиоративных корректировок, обеспечивающих гравитационный сток воды. Есть определенный промежуток времени, обозначенный условно, как  $t_{300}$ , в течение которого происходит понижение потенциала Eh с +600 мВ до +300 мВ [3]. Если понижения Eh требует больше времени, чем процесс естественной обтекаемости почвы, то необходим дренаж, если

же уровень  $Eh$  падает быстро, то необходима мелиоративная корректировка, иначе в результате недостатка молекулярного кислорода уровень железа в почве будет увеличиваться. При чрезмерном количестве ионов двухвалентного железа происходит интоксикация сельскохозяйственных культур в период вегетации.

На основе имеющихся данных автор предложил скорректировать существующую парадигму водной мелиорации. Им были выдвинуты следующие утверждения:

- сельскохозяйственные культуры гибнут от дефицита молекулярного кислорода, а не от излишка воды в почве;
- недостаток или избыток молекулярного кислорода в почве, обусловленный изменением водного режима, вызывает гидроокисленную деградацию;
- водная мелиорация способна не только оптимизировать условия возделывания сельскохозяйственных культур, но и предотвратить гидроокисленную деградацию.

Парадигма, поставленная таким образом, указывает на совершенно новое значение и будущее водной мелиорации, являющейся важным мероприятием, способствующим охране агроэкологических свойств почв. В связи с этим необходимо подчеркнуть их влияние на формирование экологических условий природной и почвенной среды. Во первых, содержание в почве определенного количества железа (с экологической точки зрения) весьма оправдано. Окислы железа являются натуральным аккумулятором относительно легкодоступного кислорода, предназначенного для использования биотическим фактором в процессе восстановления. После устранения недостатка кислорода в почве восстановленное двухвалентное железо присоединяет кислород, приводя почву в первичное состояние путем осаждения в почвенном профиле нерастворимых полутораокислов железа. Однако в результате продолжительного насыщения водой и аноксии почвы растворимая в воде двуокись железа может вымываться водой из почвенного профиля, что лишает почву выгодного с экологической точки зрения свойства. При верно отрегулированном водном режиме почва сохраняет все полезные свойства и не подвергается гидроокисленной деградации.

Еще одной не менее важной задачей водной мелиорации является предотвращение образования и восстановления в почве нитратов, например, закиси азота  $N_2O$  [18].

Кроме того водная мелиорация регулирует процесс минерализации органического вещества и эмиссии  $CO_2$  с помощью мелиоративного орошения, которое имеет как экологическое (секвестрация углерода в почве), так и производственное значение.

Из выше представленного следует, что кислородное состояние почвы является агроэкологическим фактором, объединяющим осушительные и оросительные мелиорации, а вода является его регулятором, управляемым с помощью мелиорации. Такая постановка вопроса определила потребность поиска параметра необходимого для этого управления. Свойством почвы, обуславливающим её кислородное состояние, является влагоемкость, а точнее количество воды, удаляемой из почвы гравитационными силами и

заполняющей почвенные поры между увлажнением, соответствующим полной и полевой влагоемкости, которое блокирует поступление воздуха и вместе с ним молекулярного кислорода в почву.

Исследования, проведенные физиками-почвоведом из Института агрофизики ПАН при участии автора, показали, что параметром, соответствующим  $t_{300}$ , является обтекаемость (скорость удаления воды из „гравитационных” пор) почвы, а точнее время  $T_{ppw}$ , в течение которого почва переходит из состояния полной в состояние полевой влагоемкости, способствуя самонасыщению кислородом.

В первой фазе исследований определены гидрофизические свойства пахотных почв [29], полная и полевая влагоемкость, а также коэффициенты фильтрации при соответствующем состоянии насыщения водой. На основе этих характеристик, используя формулу Ван Генухтена-Нильсона [29], почвоведы из Института агрофизики ПАН построили модель и алгоритм для расчета параметра  $T_{ppw}$ .

Таким образом, стало возможным определить параметр, характеризующий чувствительность почв к гидроокислительной деградации, выраженный показателем  $D_{ho}$ , рассчитываемым по формуле:

$$D_{ho} = T_{ppw} / t_{300} \quad (1)$$

Параметр чувствительности почв является количественным критерием оценки потребности в дренаже почвы в случае, когда  $D_{ho} > 1$ . Это соответствует поставленной гипотезе возникновения аноксии, выраженной неравенством  $t_{300} < T_{ppw}$ . При этом разница  $T_{ppw} - t_{300}$  определяет допустимое время, в течение которого с помощью дренажа необходимая часть почвенного профиля (корневая зона) должна быть освобожденная от «гравитационной» воды и насыщена воздухом, содержащим молекулярный кислород.

#### **Пространственная характеристика окислительно-восстановительных свойств и гидроокислительной деградации пахотных почв Польши**

Следующий этап исследований заключался в практическом подтверждении изложенных выводов путем получения соответствующего опытного материала. Эту задачу решили совместными усилиями Институт агрофизики ПАН и Институт мелиорации и луговодства (в настоящее время Технолого-природоведческий институт) с 1985 по 2005 год.

Для начала следовало собрать почвенные образцы из 1000 почвенных профилей, характеризующих пахотные почвы Польши. Эту работу, соответственно с подготовленной методикой, выполнили почвоведы-мелиораторы из проектных бюро мелиорации, которые описали эти разрезы и собрали около 3000 образцов с нарушенной структурой и 10000 герметических цилиндров с ненарушенной структурой. Таким образом, в Институте агрофизики ПАН был создан банк почвенных образцов [2] необходимых для выполнения лабораторных работ, характеризующих окислительно-восстановительные свойства пахотных почв, параметризованных неравенством  $t_{300}$  и  $T_{ppw}$ . Банк представляет собой совокупность

статистически обоснованного количества почвенных образцов, отражающего пространственное участие 29 объединенных почвенных единиц в структуре почвенного покрова пахотных угодий Польши в масштабе 1:2500000.

Параметризация  $t_{300}$  являлась пионерским мероприятием и потребовала особенной методической разработки [4]. Так как величина  $t_{300}$  зависит от температуры и глубины почвы, её принято характеризовать до глубины 100 см в пахотном, подпахотном и подпочвенном слоях при следующих температурах почвы:

- +4 °C – температурные условия неблагоприятные для вегетации;
- +10 °C – температура, подходящая для инициальных фаз развития растений;
- +15 °C – приблизительная средняя температура вегетационного периода;
- +20 °C – температура, соответствующая условиям полной вегетации в течение летних месяцев.

Перед опытами для чистоты эксперимента все образцы почв просеяли через мелкое сито. После этого их засыпали в отдельные герметические емкости, залили водой в весовой пропорции 1:1 и, предварительно выставив нужную температуру, поместили в инкубатор, измеряя динамику падения потенциала  $E_h$  до уровня +300 мВ, определяя для каждого образца величину  $t_{300}$  в сутках. Усредненные для отдельных почв результаты объединили в диапазоны времени с целью их использования в картографических целях. Фрагмент этих результатов содержит табл. 2.

**Таблица 2. Величины параметра  $t_{300}$  для некоторых пахотных почв**

| Почвенные единицы                             | Слои почвы   | Потенциальная окислительно-восстановительная устойчивость (сутки) при разной температуре почвы |         |         |         |
|-----------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|
|                                               |              | + 4 °C                                                                                         | + 10 °C | + 15 °C | + 20 °C |
| <b>Лёссовые черноземы</b>                     | пахотный     | £ 10                                                                                           | £ 3     | 1-2     | £ 1     |
|                                               | подпахотный  | 15-25                                                                                          | 3-5     | £ 2     | £ 2     |
|                                               | подпочвенный | 10-20                                                                                          | 2-5     | 2-5     | £ 2     |
| <b>Темноцветные дерновые</b>                  | 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     |
| <b>Тяжелосуглинистые аллювиальные</b>         | пахотный     | £ 20                                                                                           | 5-7     | 2-3     | 1-2     |
|                                               | подпахотный  | 15-25                                                                                          | 5-7     | 2-5     | 2-4     |
|                                               | подпочвенный | 20-40                                                                                          | 5-10    | 5-10    | 4-8     |
| <b>Среднесуглинистые бурые</b>                | пахотный     | 15-20                                                                                          | 5-7     | 3-5     | 2-3     |
|                                               | подпахотный  | ≥ 25                                                                                           | ≥ 10    | 5-8     | 4-6     |
|                                               | подпочвенный | ≥ 40                                                                                           | 15-20   | 5-10    | 4-8     |
| <b>Среднесуглинистые поверхностно глеевые</b> | пахотный     | ≥ 20                                                                                           | 7-10    | 7-10    | ≥ 3     |
|                                               | подпахотный  | ≥ 25                                                                                           | ≥ 10    | ≥ 8     | ≥ 6     |
|                                               | подпочвенный | 20-40                                                                                          | 10-15   | 5-10    | ≥ 8     |

Полный состав величин  $t_{300}$  для всех исследуемых почв представлен в работе автора, опубликованной в журнале *Fragmenta Agronomica* [16]. Следует уточнить, что полученные результаты определяют потенциальную устойчивость почв, которая зависит только от их собственных свойств. В полевых условиях  $t_{300}$  будет тоже в существенной степени зависеть от фазы развития и вида возделываемого растения.

Вторым искомым компонентом для расчета  $D_{ho}$  является  $T_{ppw}$ . Для его определения использованы цилиндры, заполненные образцами почв с ненарушенной структурой. Так как после испытаний почва в цилиндре не пригодна для последующих опытов, следовало подобрать программу для исследовательских испытаний водно-физических свойств почв с использованием аппарата Ричардса [29].

Искомым параметром  $T_{ppw}$  является время, в течение которого почва изменит свое состояние от полной до полевой влагоемкости. Сопутствующий этому явлению сток воды имеет неравномерный характер с убывающим трендом, связанным с увеличением сосущей силы почвы в условиях одностороннего вертикального потока воды, на который не воздействует уровень грунтовых вод.

Для математического описания этого явления в Институте агрофизики ПАН разработали соответствующую модель стока гравитационной воды, основанную на отображении движения воды с использованием мономерных уравнений первого ряда (порядка) с учетом плотности потока воды, зависимой от коэффициента фильтрации и потенциала почвенной влаги  $rF$  (логарифм числа сантиметров столба воды, соответствующего давлению, с каким почва связывает воду [19]), рассчитанного по уравнению Ван Генухтена. Составление компьютерной программы для решения этой модели, содержащей выше представленные уравнения, позволило на основе полученных опытных данных рассчитать параметр  $T_{ppw}$  для рассматриваемых почв.

В последствии при наличии числовых значений  $t_{300}$  и  $T_{ppw}$  был рассчитан показатель  $D_{ho}$  для трех слоев исследуемых почв. При оценке чувствительности к гидроокисной деградации рассматривались следующие пахотные почвы:

**N** – нечувствительные к гидроокисной деградации почвы, в которых во всем профиле  $D_{ho} \geq 1$ ,

**MW** – малочувствительные к гидроокисной деградации почвы, в которых условие  $D_{ho} < 1$  отмечено только в одном диагностическом слое (пахотном, подпахотном или подпочвенным),

**W** – чувствительные к гидроокисной деградации почвы, в которых показатель  $D_{ho} < 1$  отмечен в двух диагностических слоях,

**BW** – очень чувствительные к гидроокисной деградации почвы, в которых во всем почвенном профиле  $D_{ho} < 1$  е.

Оценку некоторых почв по показателю  $D_{ho}$  составлена в табл. 3.

Таблица 3 – Средние величины  $D_{ho}$  и оценка чувствительности к гидроокисной деградации некоторых пахотных почв

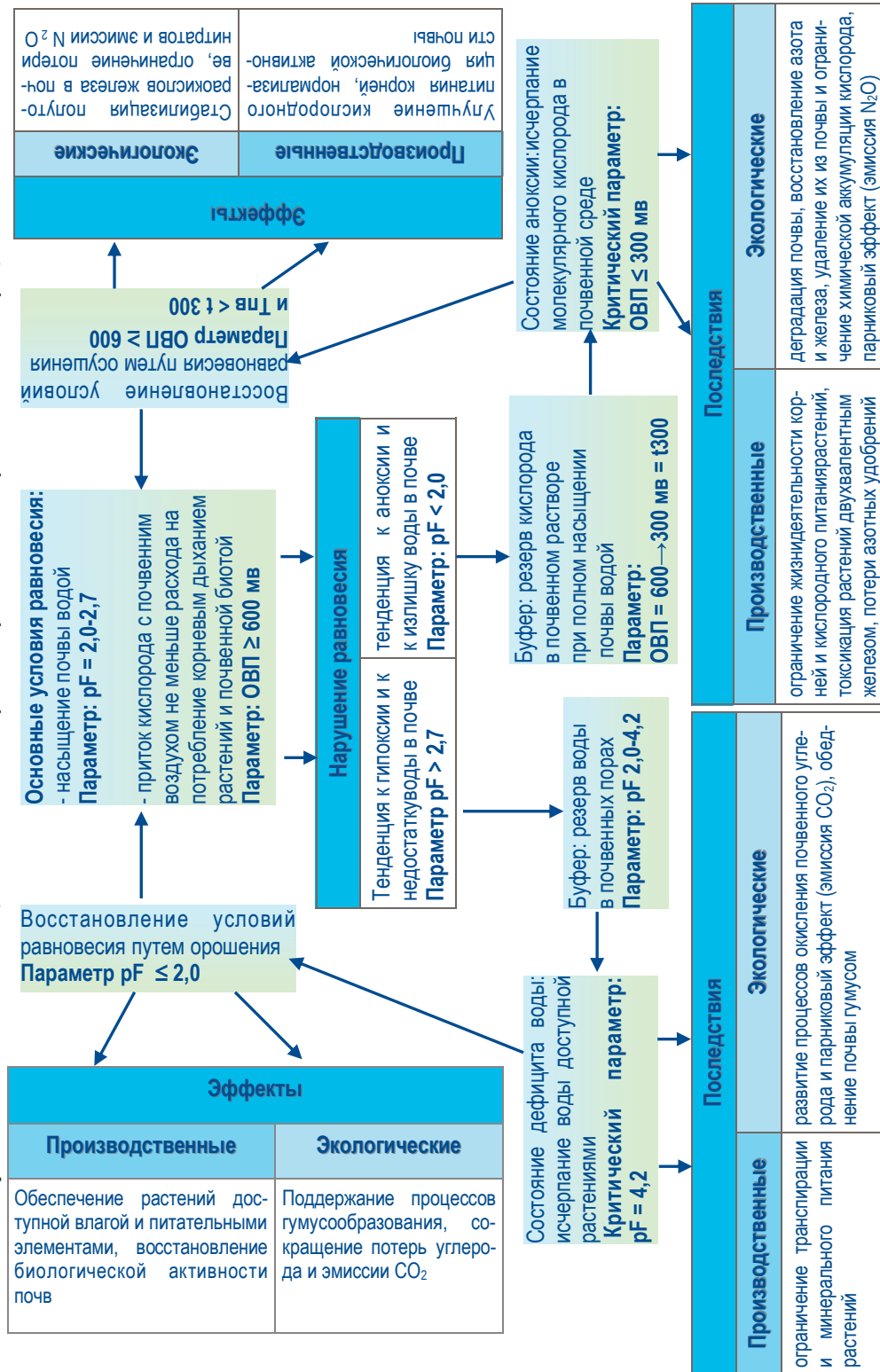
| Почвенная единица                           | Усредненные величины $D_{ho}$ в слое: |             |              | Оценка чувствительности |
|---------------------------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------|-------------------------|
|                                             | пахотном                              | подпахотном | подпочвенном |                         |
| Лёссовые черноземы                          | 0,17                                  | 0,28        | 0,20         | BW*                     |
| Лессовидные бурые и элювированные           | 0,43                                  | 0,20        | 0,54         | BW                      |
| Темноцветные, дерновые                      | 0,60                                  | 0,75        | 0,60         | BW                      |
| Тяжелосуглинистые, аллювиальные             | 0,60                                  | 0,75        | 1,33         | W                       |
| Пылеватосуглинистые поверхностнооглеенные   | 0,33                                  | 0,91        | 1,09         | W                       |
| Песчанистосуглинистые поверхностнооглеенные | 1,80                                  | 1,20        | 0,75         | MW                      |
| Легкосуглинистые бурые                      | 1,50                                  | 1,80        | 1,85         | N                       |

Полная числовая характеристика параметра  $D_{ho}$  представлена в коллективной работе с участием автора [19]. Но даже в приведенных в настоящей статье данных обозначена обратная связь между окислительно-восстановительной устойчивостью и чувствительностью к гидроокисной деградации пахотных почв. Полученные на основе усредненных величин  $D_{ho}$  оценки чувствительности почв к гидроокисной деградации были введены в почвенно-картографическую базу данных, а после авторского программирования алгоритма, объединяющего эти оценки с данными по структуре почвенного покрова, с помощью компьютерной программы была создана соответствующая тематическая карта.

На основе более глубокого анализа полученных результатов исследований возникает предположение, что динамика развития восстановительных процессов зависит от содержания органического вещества, так как почвы с повышенным содержанием гумуса имеют большую чувствительность к гидроокисной деградации. Усиление окислительных процессов способствует минерализации органического вещества, чему сопутствует ограничение количества воды в почве. Таким образом, можно предположить, что метаболизм органического вещества в почве тесно связан с её кислородным состоянием. Практическим доказательством этого является образование органических почв в болотных условиях и безгумусных почв в условиях пустыни.

На основе вышеизложенных положений была сделана попытка построения схематической модели оптимизации водного и кислородного режима почвы, поддерживаемого мелиорацией на агроэкологической основе (рис.2).

Целесообразным является исследование связи  $Eh$  со склонностью почвы к гипоксии, установление агроэкологических показателей, оптимизирующих оросительные системы соответственно с поставленной парадигмой, включая охрану почвенного гумуса.



Условные обозначения для рис. 2:

**pF** – показатель потенциала почвенной влаги;

**ОВП** – окислительно-восстановительный потенциал в почве;

**t<sub>300</sub>** – время, в течение которого в насыщенной водой почве ОВП понижается до 300 мВ;

**ТПВ** – время оттока гравитационной воды из почвы (от полной до полевой влагоемкости).

#### Библиографический список

1. Gliński J., Duliban J., 1972: Potencjał oksydoredukcyjny w glebach. Окислительно-восстановительный потенциал в почвах. Problemy Agrofizyki z. 3, Ossolineum, стр.45.
2. Gliński J., Ostrowski J., Stępniewska Z., Stępniewski W., 1991: Bank próbek glebowych reprezentujących gleby mineralne Polski. Банк почвенных образцов минеральных почв Польши. Problemy Agrofizyki z.66, Ossolineum, стр. 61.
3. Gliński J., Stępniewska Z., 1986: Wskaźniki odporności gleb na redukcję. Показатели устойчивости почв к восстановлению. Zesz.Probl.Post.Nauk Rol. z.315, PWRiL, стр. 81-94.
4. Gliński J., Stępniewska Z., 1986: An evaluation of soil resistance to reduction processes. Pol.J.Soil Sci. 19, стр. 15-19.
5. Gliński J., Stępniewska Z., Stępniewski W., Banach A., 2012: Oxydation-reduction (Redox) properties of soils. Polish Acad.ofSci., Branch of Lublin, стр.129.
6. Gliński J., Stępniewski W., Łabudzki L., 1983: Pobieranie tlenu i wydzielanie dwutlenku węgla w środowisku glebowym. Кислородное питание и эмиссия CO<sub>2</sub> в почвенной среде. Problemy Agrofizyki z.39, Ossolineum, стр.72.
7. Kowalik P., 1971: Analiza wpływu melioracji wodnych na natlenienie gleb. Анализ влияния водных мелиораций на кислородный режим почв. Zesz. Nauk. P.Gdań., Bud.Wodne XV, 3, стр. 38.
8. Kowalik P., Stępniewski W., 1979: The significance of soil aeration for plants. Zesz.Probl.Post.Nauk.Rol.z.220, стр. 61-80.
9. Kubina W.I., 1953: Bestimmungsbuch und Systematik der Boden Europas. Stuttgart, стр. 392.
10. Łabudzki L., 2006: Susze rolnicze. Zarys problematyki oraz metody monitorowania i klasyfikacji. Сельскохозяйственные засухи. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, monogr. nr 33, стр.107.
11. Łabudzki L., 2007: Estimation of local drouth frequency in central Poland using the standardized precipitation index SPI. Irrigation and Drainage. Volume 56, Issue 1, стр. 67-77.
12. Maciak F., Zawadzki S., 1981: Rola i kierunki rozwoju melioracji w Polsce. Роль и направление развития мелиорации в Польше. Zeszyty Probl. Post. Nauk Roln., z.248, стр. 13-29.
13. Ministerstwo rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej, 1996: Program rozwoju melioracji do roku 2015. Программа развития мелиорации до 2015 года. Warszawa.
14. Muckenhansen E., 1963: Le pseudogley. Sci.du sol. № 1, стр. 21-29.
15. Ostrowski J., 1976: Badania i ocena warunków glebowo-przyrodniczych dla potrzeb melioracji gruntów ornych. Исследования и оценка почвенных условий для нужд мелиорации пахотных земель. Biblioteczka Wiad. IMUZ. № 52, стр. 55-124.
16. Ostrowski J., 2002: Agroekologiczne aspekty kształtowania warunków natlenienia gleb uprawnych. Агроэкологические аспекты формирования кислородных условий пахотных почв. Fragmenta Agronomica (XIX) № 2 (74), стр. 207-214.
17. Ostrowski J., Łabudzki L., Kowalik W., Kanecka-Geszke E., Kasperska-Wołowicz W., Szamańska K., Tusiński E., 2008: Atlas niedoborów wodnych roślin uprawnych i użytków zielonych w Polsce. Атлас дефицитов воды полевых культур и лугопастбищных угодий в Польше. Falenty, IMUZ. стр. 14+32 карты.
18. Ostrowski J., Gliński J., Stępniewska Z., Stępniewski W., Szmagara A., 2000: A contribution to the assessment of potential denitrification in arable mineral soils of Poland. Journal of Water and Land Development № 4, Pol.Acad. of Sci., стр. 175-183.
19. Ostrowski J., Walczak R., Stawiński C., 2004: Ocena i kartograficzna prezentacja wrażliwości gleb ornych na hydrooksygeniczną degradacją. Оценка и картографическое изображение чувствительности почв к гидрооксигенной деградации. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T.4. Z.2a (11), стр. 185-200.

20. Ruskowska M., Terelak T., 1992: Wpływ warunków powietrzno-wodnych na zachowanie się składników pokarmowych i procesy fizjologiczne roślin. Влияние водно-воздушных условий на питательные элементы и физиологические процессы растений. *Problemy Agrofizyki*, z.56, Ossolineum, стр. 53-64.
21. Siuta J., 1963: Wpływ procesu glejowego na kształtowanie się cech morfologicznych i właściwości chemicznych profilu glebowego. Влияние глеевого процесса на образование морфологических и химических свойств почвенного профиля. *Pamiętnik Puławski*, z.9, PWRiL, стр. 99-150.
22. Siuta J., Motowicka-Terelak T., 1969: The origin systematics of ferruginous and in present-day soils. *Biuletyn Peryglacjalny* nr 18. стр.209-257.
23. Siuta J., Ostrowski J., 1970: Rozpoznanie stosunków wilgotnościowych gleb na podstawie oględzenia i wytrąceń żelazistych. Диагностирование водного режима почв на основе оглеения и железистых почвообразований. *Melioracje Rolne, Biul. inf. nr 5, CBS i PWM Bipromel. Warszawa.* стр. 4-7.
24. Stępniewska Z., 1988: Właściwości oksydoredukcyjne gleb orných Polski. Окислительно-восстановительные свойства пахотных почв Польши. *Problemy Agrofizyki* z.56, стр. 124.
25. Stępniewska Z., Stępniewski W., Gliński J., Ostrowski J., 1997: Atlas oksydoredukcyjnych właściwości gleb orných Polski. Атлас окислительно-восстановительных свойств пахотных почв Польши. *IA PAN, IMUZ.* стр. 11+33 карты.
26. Stępniewski W., Gliński J., 1984: Procesy transportu gazów w glebie i skład powietrza glebowego. Процессы передвижения газов в почве и состав почвенного воздуха. *Problemy Agrofizyki* z.42, Ossolineum, стр. 112.
27. Stępniewski W., Gliński J., 1984: Reakcja roślin na stan aeracji gleb. Реакция растений на аэрацию почвы. *Problemy Agrofizyki* z.45, Ossolineum.
28. Stępniewski W., Stępniewska Z. 1998: Oxygenology as a new discipline in the environmental sciences (a proposal for discussion). *Int.Agorphysics* 12, стр. 53-56.
29. Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Stawiński C., 2002: Hydrofizyczne charakterystyki mineralnych gleb orných Polski. Гидрофизические характеристики минеральных почв Польши. *Acta Agorophysics* Nr 79. Rozpr. i monogr., Lublin *IA PAN*, стр. 64+32 карты.
30. Van Genuchten M.Th., Nielsen D.R., 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Ann. Geophys.* 35, стр. 615-628.
31. Винокуров, И.Ю., 2007: Эволюция почвенных экосистем: химическое загрязнение, саморегуляция, самоорганизация, устойчивость. Москва, Юркнига, стр. 320.
32. Высоцкий, Г.Н., 1905: Глей. *Почвоведение* № 4, стр. 291-327.
33. Зайдельман, Ф.Р., 2004: Морфоглеегенезис, его визуальная и аналитическая диагностика. *Почвоведение* № 4, стр.389-398.
34. Кауричев, И.С., 1979: Типы окислительно-восстановительного режима почв. *Почвоведение* № 3, стр. 35-45.
35. Островски, Я., 1972: Почвенно-мелиоративные исследования в Польской Народной Республике. *Почвоведение* № 12, стр. 116-126.
36. Савич, В.И., Кауричев, И.С., Шипов, Л.Л., Никольский, Ю.Н., Романчик, Е.А., 2004: Агрономическая оценка окислительно-восстановительного состояния почв. *Почвоведение* № 6, стр. 702-712.

#### Summary

*Ja. Ostrovski*

#### AGROECOLOGICAL BASIS OF OXYGEN REGIME FORMATION OF ARABLE SOILS USING WATER RECLAMATION IN POLAND

In the 50-90 scientific research concerning improvement in diagnostic of waterlogged soils in Poland were carried out during drainage melioration of arable soils. This study was focused on morphological features of soils which help to forecast soil anoxia. This evaluation method was widely used and qualitative in nature. Its principle was the basis of new branch of water melioration, directed to support oxygen balance in soil. In the result parameters of soil redox optimal for Poland were defined.

*Поступила 4.03.2015*