

29. Чесняк, Г. Я. Определение параметров свойств черноземов типичных мощных разного уровня плодородия / Г. Я. Чесняк // Теоретические основы и методы определения оптимальных параметров свойств почв. – М., 1980. – С. 42–50.

30. Состав и активные формы гумуса дерново-подзолистых суглинистых и супесчаных почв и их связь с урожаем сельскохозяйственных культур: отчет о НИР (промеж.) / БГСХА; рук. темы А. И. Горбылева. – Горки, 1985. – 13 с. – № ГР 84010948.

TO THE QUESTION OF THE QUALITATIVE STATE OF THE PHYSICAL CLAY FRACTION SODDY-PALE-PODZOLIC LIGHT LOAMY SOILS

S. V. Dydyshka, T. N. Azarenok, O. V. Matychenkova

Summary

Using the balance method, the features of the quantitative content of fractions of physical clay (medium and fine dust, and silt) relative to their content in the parent rock were established, and the features of their ratio and redistribution in physical clay as a result of prolonged agrogenic impact in comparison with natural soils were revealed. A new interpretation of the granulometric composition of soddy-pale-podzolic light loamy soils is presented and the presence of a general principle of the relationship between the fractions of physical clay and soil humus through the constants of dynamic equilibrium, as well as between the indicators of humus-granulometric ratios and the productivity of soils is shown. The data obtained can be applied as a new method for assessing soil fertility.

Поступила 15.04.21

УДК 631.43

ПЕДОТРАНСФЕРНЫЕ ФУНКЦИИ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ К ЭРОЗИИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ЛЕССОВИДНЫХ СУГЛИНКАХ

**И. А. Логачев, Н. Н. Цыбулько, В. Б. Цырибко,
А. М. Устинова, И. И. Касьяненко**

*Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Почвенное плодородие во многом зависит от ее физического состояния, одним из важнейших показателей которого является структурно-агрегатный состав.

Структура обуславливает водный, воздушный, тепловой режимы почвы, влияет на формирование и развитие почвенной биоты.

На формирование агрегатов влияет широкий перечень факторов. Размер и форма структурных отдельностей в значительной степени определяются содер-

жанием глинистых минералов [1]. В то же время рядом исследований [2, 3] выявлено, что на размеры агрегатов также влияют и другие минералы. Преобладание в структурных отдельностях кварца указывает на малопрочность агрегатов. Более устойчивыми оказываются образования, в составе которых преобладают полевые шпаты и глинистые минералы монтмориллонитовой группы. При этом важно отметить, что глинистые минералы активно участвуют в структурообразовании, но им не принадлежит главная роль в данном процессе [4].

Важнейшую роль в формировании почвенной структуры, а также в водоустойчивости, играет содержание органического вещества [1, 5]. Вторым важным агрохимическим показателем является содержание кальция, который входит в коллоидный комплекс почв и обуславливает коагуляцию почвенных коллоидов. При насыщении почвенно-поглощающего комплекса основаниями до 80 % и более дисперсность почвы уменьшается, а фильтрация воды значительно усиливается [6].

Из физических свойств наибольшее влияние на структуру и водоустойчивость оказывает плотность почвы [7].

В настоящее время исследования почвенных агрегатов и устойчивости их к деградации становятся все более актуальными, однако прямое изучение данных почвенных свойств трудоемко и занимает много времени. К прямым методам относятся метод «сухого» и «мокрого» просеиваний Саввинова, построение изображений с помощью томографов, использование специального оборудования для симулирования процессов эрозии [8, 9].

В связи с этим широкое распространение получают педотрансферные функции, которые позволяют с достаточной достоверностью прогнозировать различные почвенные показатели, в том числе структуру и водоустойчивость на основании агрохимических и агрофизических свойств [10]. При этом существующие педотрансферные функции имеют очень ограниченный потенциал для прогнозирования, потому что разработаны для конкретных почв [11]. Учитывая, что точность прогнозирования зависит от количества почвенных образцов и степени обобщения почвенного таксона, многие исследования сосредотачиваются на повторной калибровке и проверке существующих функций или на разработке более новых [12, 13].

Почвам характерна высокая степень пространственной неоднородности, изменчивости агрохимических и агрофизических свойств. При различной степени антропогенной нагрузки математическое отражение взаимосвязей существенно отличается [14]. В связи с этим для каждого вида земель необходимо создание своих педотрансферных функций.

Цель исследований заключалась в разработке педотрансферных функций структурно-агрегатного состава и устойчивости к эрозии дерново-подзолистых почв, развивающихся на лессовидных легких суглинках, занятых пахотными землями.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования являлись дерново-подзолистые эродированные почвы на легких лессовидных суглинках, стационара «Стоковые площадки» Минского района Минской области, являющиеся в геоморфологическом отношении единой

почвенно-эрозионной катеной. На водораздельной равнине (плакоре) расположены незеродированные почвы, в верхней части склона – среднеэродированные, в средней части – сильноэродированные, у подножия склона – намытая почва.

Исследования проводились в звене зернового севооборота: овес (2018 г.) – яровой рапс (2019 г.) – яровая пшеница (2020 г.).

Отбор монолитов для структурно-агрегатного анализа производился в середине вегетации и перед уборкой сельскохозяйственных культур.

В процессе исследований определялись показатели, характеризующие структурно-агрегатный состав пахотного горизонта почв, исходя из данных сухого и мокрого просеивания, которые определяются по методу Саввинова:

- коэффициент структурности (Кстр.) – соотношение содержания агрономически ценных агрегатов (0,25–10 мм) к сумме агрегатов > 10 и <0,25 мм при сухом просеивании;
- водоустойчивость по классификации Качинского – содержание агрегатов больше 0,25 мм при мокром просеивании, %;
- коэффициент водопрочности (Квпр.) – соотношение количества водоустойчивых агрегатов более 0,5 мм (%) при мокром и сухом просеивании [15].

Выбор этих показателей для характеристики агрегатов пахотного горизонта почв обусловлен тем, что они определяют устойчивость структуры к разрушению.

Также был проведен отбор сопряженных образцов для определения агрохимических и физических свойств почв.

Плотность почвы определяли буровым методом при помощи колец Капецкого (метод «режущих колец»), показатели пористости – расчетными методами [15].

Лабораторно-аналитические исследования агрохимических показателей почв выполнялись по следующим методикам: органическое вещество (гумус) – по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91); сумма поглощенных оснований и гидролитическая кислотность по Каппену (ГОСТ 27821-88; ГОСТ 26212-91).

Математическая обработка данных и корреляционно-регрессионный анализ выполнены с использованием программного обеспечения MS Excel и онлайн-сервиса Math.Semestr [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследований для определения взаимосвязей противозерозионной устойчивости и структурного состояния почв и их свойств было отобрано более 100 сопряженных почвенных проб на дерново-подзолистых почвах, сформированных на лессовидных суглинках. С помощью пакета анализа данных MS Excel проведен корреляционный анализ, результаты которого показали, что средние и сильные взаимосвязи существуют (коэффициент корреляции выше 0,4) между показателями плотности, содержания гумуса с водоустойчивостью, содержанием агрономически ценных и водопрочных агрегатов. Корреляция степени насыщенности основаниями не показала значимой взаимосвязи с каким-либо показателем. Статистически значимых взаимосвязей между значениями средневзвешенного диаметра при «сухом» и «мокроем» просеивании также не выявлено. На основании анализа литературных данных [4] было выявлено наличие средней корреляционной связи между соотношением степени обеспеченности основаниями и содержания гумуса и показателями водоустойчивости и содержания агрономически цен-

ных агрегатов. Это отношение показывает обеспеченность почвы склеивающим веществом водопрочных агрегатов.

Выявленные взаимосвязи при корреляционном анализе позволили в дальнейшем провести регрессионный анализ, составить уравнения и построить графики линейной зависимости между показателями, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

Уравнения регрессии и коэффициент детерминации взаимосвязей агрофизических и агрохимических свойств дерново-подзолистых почв, сформированных на лессовидных суглинках

Независимая переменная	Зависимая переменная	Уравнение регрессии	r	R ²
Плотность	Содержание агрономически ценных агрегатов (10–0,25 мм)	$y = -74,762x + 164,85$	0,66	0,44
Плотность	Содержание агрономически ценных агрегатов (5–0,25 мм)	$y = -83,341x + 158,18$	0,71	0,50
Плотность	Водоустойчивость	$y = -26,648x + 50,832$	0,46	0,21
Пористость	Содержание агрономически ценных агрегатов (5–0,25 мм)	$y = 2,1495x - 56,5$	0,63	0,40
Содержание гумуса	Водоустойчивость	$y = 9,8251x + 0,6205$	0,64	0,41
Содержание гумуса	Содержание агрономически ценных агрегатов (10–0,25 мм)	$y = 15,786x + 40,123$	0,57	0,32
Содержание агрегатов 5–0,25 мм	Водоустойчивость	$y = 0,3234x + 1,0191$	0,48	0,23
Степень насыщенности основаниями/ содержание гумуса	Водоустойчивость	$y = -10,806x + 20,945$	0,48	0,23
Степень насыщенности основаниями/ содержание гумуса	Содержание агрономически ценных агрегатов (10–0,25 мм)	$y = -27,859x + 79,64$	0,49	0,24

После установления зависимостей между агрофизическими и агрохимическими свойствами, и содержанием агрономическим ценных агрегатов определены параметры построения педотрансферной функции. На основании полученных данных о структурном состоянии почв, сформированных на лессовидных легких суглинках, в качестве зависимой переменной выбран показатель содержания агрономически ценных агрегатов, а в качестве независимых – содержание гумуса, плотность и соотношение степени насыщенности основаниями к содержанию гумуса.

При помощи размещенного в интернете сервиса Math.Semestr [16] был обработан массив данных характеризующий структурное состояние почв. В результате получено уравнение множественной регрессии:

$$C = 76,0176 + 17,7165H - 50,4122D + 0,1795 V/H,$$

где C – сумма агрономически ценных агрегатов (5–0,25 мм), %; H – содержание гумуса, %; V – степень насыщенности основаниями, %; D – плотность почвы, г/см³.

Множественный коэффициент корреляции 0,7082 указывает на сильную связь между изучаемыми факторами. Это позволяет использовать данное уравнение в качестве модели прогнозирования структурного состояния почвы. Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации 50,15 % общей вариабельности содержания агрономически ценных агрегатов (5–0,25 мм) объясняется изменением выбранных факторов.

На основании полученных в ходе исследования данных о структурном состоянии и устойчивости к эрозии почв, сформированных на лессовидных суглинках, при помощи размещенных в интернете сервисов по проведению многофакторного регрессионного анализа (данная функция отсутствует в MS Excel) создана модель, позволяющая оценить противозерозионную устойчивость почв. Все расчеты и аналитика выполнена на интернет сервисе математического анализа Math.Semestr [16].

После установления зависимостей между агрофизическими и агрохимическими свойствами, и устойчивостью почв к эрозионной деградации были определены переменные для использования в педотрансферной функции. В качестве зависимой переменной был выбран показатель водоустойчивости, а в качестве независимых – содержание гумуса, плотность и соотношение степени насыщенности основаниями к содержанию гумуса.

В результате расчетов получено уравнение противозерозионной устойчивости дерново-подзолистой почвы на лессовидных суглинках:

$$B = 1,2097 + 11,0437H - 5,2627D + 0,0646V/H,$$

где B – водоустойчивость, %; H – содержание гумуса, %; V – степень насыщенности основаниями, %, D – плотность почвы, г/см³.

Множественный коэффициент корреляции 0,705 указывает на сильную связь между изучаемыми факторами. Это позволяет использовать данное уравнение в качестве модели прогнозирования противозерозионной устойчивости почвы. Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации 49,67 % общей вариабельности водоустойчивости объясняется изменением изучаемых факторов.

Используя полученные педотрансферные функции были определены параметры модельной почвы, обеспечивающие оптимальное структурное состояние и устойчивость к эрозионной деградации (табл. 2).

Таблица 2

Диапазоны значений агрофизических и агрохимических свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы на лессовидных суглинках, формирующие оптимальную структуру и противозерозионную устойчивость

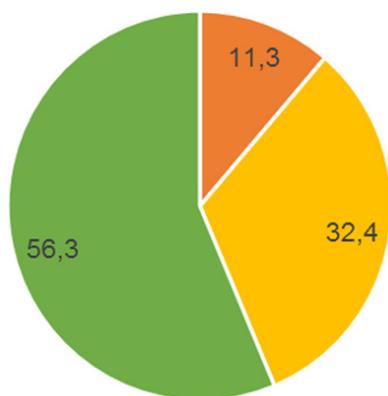
Показатель	Значение
Структура почвы	Мелкокомковатая
Содержание агрономически ценных агрегатов (10–0,25 мм)	Более 60 %
Содержание агрономически ценных агрегатов (5–0,25 мм)	Более 45 %
Содержание водопрочных агрегатов (10–0,25 мм)	30–75 %
Содержание гумуса (для оптимальной структуры)	более 1,6 %
Содержание гумуса (для устойчивости к эрозионной деградации)	Более 3 %

Окончание табл. 2

Показатель	Значение
Запасы гумуса	Более 110 т/га
Плотность (для оптимальной структуры)	1,0–1,35 г/см ³
Плотность (для устойчивости к эрозионной деградации)	1,0–1,2 г/см ³
Пористость	55–65 %
pH _{KCl}	6,0–6,5
Степень насыщенности основаниями	Более 85 %

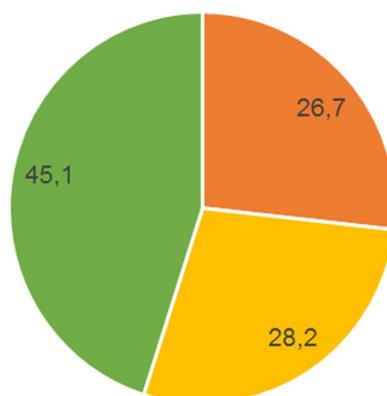
Стоит отметить, что дерново-подзолистые почвы, сформированные на лесовидных суглинках, обладают благоприятной структурой и низкой противозерозионной стойкостью, что обусловлено генетическими особенностями почвообразующих пород [17–18]. Это находит отображение в необходимых значениях содержания гумуса и плотности для достижения оптимальных параметров.

Для оценки эффективности разработанных педотрансферных функций была проведена верификация уравнений на всем массиве обработанных данных. Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных величин, в результате выделено три группы по отклонению фактических показателей от экспериментальных (рис. 1 и 2).



■ >30% ■ 15-30% ■ 0-15%

Рис. 1. Распределение расчетных показателей содержания агрономически ценных агрегатов 5–0,25 мм с различным отклонением от экспериментальных



■ >30% ■ 15-30% ■ 0-15%

Рис. 2. Распределение расчетных показателей водоустойчивости с различным отклонением от экспериментальных

Прогнозные значения содержания агрономически ценных агрегатов существенно отличаются (более 30 %) в 11,3 % обработанных данных, еще в 32,4 % случаях различие составляет 15–30 %. В группу с наименьшими отличиями (0–15 %) входит 56,3 % массива значений. При этом в 15,5 % случаев различие расчетных и фактических значений составило менее 5 %.

Сопоставимое распределение характерно и для показателей водоустойчивости. Группы со значительными отклонениями составляют 26,7 % обработанных зна-

чений, со средними – 28,2 %, с наименьшими – 45,1 %. В группу с отклонениями менее 5 % относятся 14,1 % данных.

Следует отметить, что несмотря на наличие групп показателей с существенными отклонениями количественных величин структурного состояния и противоэрозионной устойчивости, при качественной характеристике отличия между прогнозными и экспериментальными минимальны. Все расчетные и фактические данные о устойчивости к водной эрозии соответствуют одинаковому диапазону значений, данные о содержании агрономически ценных агрегатов имеют единичные отличия.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили установить взаимосвязи между агрохимическими, физическими свойствами и структурным состоянием почв и их противоэрозионной устойчивостью. Наиболее высокая зависимость водоустойчивости получена с содержанием гумуса, плотностью, а также соотношением степени насыщенности основаниями к содержанию гумуса. На основании полученных зависимостей разработаны педотрансферные функции структурного состояния и противоэрозионной устойчивости дерново-подзолистых почв, сформированных на лессовидных суглинках. Они имеют следующий вид:

$$C = 76,0176 + 17,7165H - 50,4122D + 0,1795 V/H,$$

$$B = 1,2097 + 11,0437H - 5,2627D + 0,0646V/H.$$

Множественный коэффициент корреляции функций более 0,7, что позволяет использовать их для прогнозирования данных свойств. Проведенная верификация показала высокую степень сходимости фактических и рассчитанных величин водоустойчивости и содержания агрономически ценных агрегатов.

Определены диапазоны агрохимических и агрофизических свойств, обеспечивающих оптимальную почвенную структуру и устойчивость к эрозионной деградации: содержание агрономически ценных агрегатов размером 10–0,25 мм – более 60 %, содержание агрономически ценных агрегатов (5–0,25 мм) – более 45 % содержание водопрочных агрегатов размером 10–0,25 мм – 30–75 %, плотность почвы – 1,00–1,20 г/см³, пористость почвы – 55–65 %, содержание гумуса – 3 % и более, запасы гумуса – 110 т/га и выше, рН_{KCl} – 6,0–6,5, степень насыщенности основаниями – более 85 % .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведев, В. В.* Структура почвы: методы, генезис, классификация, эволюция, география, мониторинг, охрана / В. В. Медведев. – Харьков: 13 типография, 2008. – 406 с.
2. *Антипов-Каратаев, И. Н.* Почвенный агрегат и его коллоидный анализ / И. Н. Антипов-Каратаев, В. В. Келлерман // Сб. трудов по агрономической физике. – 1960. – Вып. 8. – С. 121–131.
3. Структурные связи и процессы структурообразования в грунтах / В. И. Осипов, В. Н. Соколов; под ред. Е. М. Сергеева // Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы. – М.: Недра, 1985. – С.104–145.

4. Николаенко, А. Н. Моделирование связи структуры почвы с содержанием органического вещества и обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} / А. Н. Николаенко, А. А. Кавокин // Вестник московского университета. Сер. 17. Почвоведение. – 2020. – № 2. – С. 24–28.
5. Федотов, Г. Н. Изучение механизма влияния органического вещества на структурно-механические свойства почвы / Г. Н. Федотов, С. А. Шоба, Д. Д. Хайдапова // Доклады академии наук. – 2014. – Т. 456, № 1. – С. 121–125.
6. Небольсин А. Н. Известкование почв (результаты 50-летних полевых опытов) / А. Н. Небольсин, З. П. Небольсина. – СПб.: ГНУ ЛНИИСХ Россельхозакадемии, 2010. – 254 с.
7. Черныш, А. Ф. Сравнительная оценка агрофизических, микроморфологических свойств и минералогического состава, отражающих степень устойчивости дерново-подзолистых почв на лессовидных и моренных суглинках к эрозионной деградации / А. Ф. Черныш, В. Т. Сергеенко, В. Б. Цырибко // Почвоведение и агрохимия. – 2014. – № 1(52). – С. 32–40.
8. Качинский, Н. А. Физика почв / Н. А. Качинский. – М.: Высш. шк., 1965. – Ч. 1. – 323 с.
9. Quantification of freeze-thaw related structure in cultivated topsoils using X-ray computer tomography / I. A. Taina [et al.] // Canadian Journal Soil Science. – 2013. – Vol. 93(4). – P. 533–553.
10. Parsons, Anthony J. How reliable are our methods for estimating soil erosion by water? / Anthony J. Parsons // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 676. – P. 215–221.
11. Kaur, R. A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk-density from basic soil data and its comparison with existing PTFs / R. A. Kaur, S. Kumar, H. P. Gurung // Soil Res. – 2002. – Vol. 40(5). – P. 847–858.
12. Pedotransfer functions for Irish soils – estimation of bulk-density (pb) per horizon type. / B. Reidy d [et. al.] // Soil. – 2016. – Vol. 2(1). – P. 25–39.
13. Schaap, M. G. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions/ M. G. Schaap, F. J. Leij, M. T. van Genuchten / J. L. Hydrology. – 2001. – Vol. 251. – P. 163–176.
14. Hakansson, I. A review of the usefulness of relative bulk-density values in studies of soil structure and compaction / I. Hakansson, J. Lipiec // Soil Tillage Research. – 2000. – Vol. 53(2). – P. 71–85.
15. Вадюнина А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – М.: Агропромиздат, 1986. – 416 с.
16. Многофакторный регрессионный анализ [Электронный ресурс] // Интернет-портал о математике и статистике. – Режим доступа: <https://math.semestr.ru/regress/corel.php>. – Дата доступа: 10.03.2021.
17. Современное агрофизическое состояние почв центральной почвенно-экологической провинции / А. Ф. Черныш [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2016. – № 1(56). – С. 15–25.
18. Роля арганічних угнаенняў і вапнавання ў фарміраванні структурнага стану і супрацьэразійнай устойлівасці дзярнова-падзолістых эрадаваных глебаў, якія развіваюцца на лёсападобных суглінках / В. Б. Цырыбка [і інш.] // Почвоведение и агрохимия. – 2020. – № 1(64). – С. 54–61.

**PEDOTRANSFER FUNCTIONS OF THE STRUCTURAL STATE
AND RESISTANCE TO EROSION OF SOD-PODZOLIC SOILS FORMED
BY LOESS-LIKE LOAMS**

**I. A. Lahachou, M. M. Tsybulka, V. B. Tsyrybka,
H. M. Ustsinava, I. I. Kasyanenko**

Summary

The article presents the results of studies of the relationship between agrochemical and agrophysical properties with the structure and resistance to erosive degradation of sod-podzolic loamy soils formed on loess-like parental material. Pedotransfer functions have been developed and verified. The ranges of soil properties that form the optimal structural state and resistance to erosion processes are determined.

Поступила 29.03.21