DOI 10.18454/PMI.2016.3.877

УДК 502.37

АНАЛИЗ ОБЪЕМНОЙ ПЛОТНОСТИ И АГРЕГАТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В ПЕРКОЛЯЦИОННЫХ КОЛОННАХ*

М.М.ХОРДАН[1], ДЖ.БЕК[2], Э.ГАРСИЯ-САНЧЕС[1], Ф.ГАРСИЯ-ОРЕНЕС[1]
[1] *Университет Мигеля Эрнандеса, Эльче, Испания*
[2] *Университет Барселоны, Барселона, Испания*

Технологии восстановления нарушенных горными работами земель требуют использования сформированных при добыче отходов. В статье предлагается способ улучшения физических свойств отходов и повышения содержания органических и питательных веществ за счет применения обработанного осадка сточных вод. Экспериментальное исследование выполнено с использованием почвенных колонн. Работа проводилась с двумя видами отходов горного производства, содержащими значительное количество карбоната кальция. Осадки сточных вод в разных дозировках (30 000 и 90 000 кг ила на 1 га) были внесены в отходы, использованные как почвообразующая порода для рекультивации. Поступление осадков было обеспечено устройством, моделирующим дождь короткой продолжительности. Выщелоченные воды собирались через 24 ч после последнего промывания. Эксперимент показал улучшение структуры почвы, о чем свидетельствуют уменьшение объемной плотности и увеличение агрегатной устойчивости. Улучшение структуры почвы уменьшает ее уязвимость к таким процессам деградации как эрозия и переуплотнение.

***Ключевые слова*:** горно-промышленные территории, рекультивация, осадок сточных вод, качество почв, отходы горного производства.

***Как цитировать эту статью*:** Хордан М.М. Анализ объемной плотности и агрегатной устойчивости в перколяционных колоннах / М.М.Хордан, Дж.Бек, Э.Гарсия-Санчес, Ф.Гарсия-Оренес // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 877-881. DOI 10.18454/PMI.2016.6.877

Введение. Применение отходов, сформированных горно-добывающим предприятием, является необходимым при восстановлении земель, нарушенных добычей полезных ископаемых [3, 4, 9, 11]. Такие отходы далеко не всегда достаточно плодородны, чтобы обеспечить успешную рекультивацию (посадку необходимых растений). В связи с этим возникает необходимость использования органических удобрений для создания подходящего субстрата [6]. Обязательное восстановление заброшенных горно-промышленных территорий и правильное применение твердых биологических отходов регулируется законодательством в области управления общими и органическими отходами и охраны почв [6]. Мировая реферативная база почвенных ресурсов WRB недавно пополнилась понятием «техносоли» (аналог российского термина «техногенные поверхностные образования) [2]. Эта новая реферативная почвенная группа включает в себя большое разнообразие субстратов природного и искусственного происхождения. К ним относятся различные сформированные на отходах почвоподобные тела: породные отвалы, полигоны захоронения отходов, шлако- и шламохранилища, в которых преобладают свойства, обусловленные техногенным происхождением, а не природными почвообразовательными процессами [7]. Правильная обработка техносолей с учетом их естественных внутренних свойств может быть эффективной и экономически целесообразной основой восстановления почв и управления отходами [7]. Предыдущие исследования показали эффективность применения осадков сточных вод (илов) для рекультивации. Использование обработанных илов может служить залогом успешного восстановления земель, нарушенных деятельностью горно-промышленных предприятий.

Многие работы посвящены изучению плодородия почв и риска загрязнения грунтовых вод [1, 8]. Тем не менее, недостаточно исследованным остается вопрос улучшения физических свойств (объемной плотности и агрегатной устойчивости) техносолей, формируемых при восстановлении ландшафтов открытых горных выработок. В данной работе представлены различные альтернативные методы определения данных свойств и основные результаты, полученные в ходе реальных экспериментов.

Материалы и методы. *Создание почвообразующей породы.* Эксперимент был проведен в форме контролируемого испытания с применением колонн, сделанных из полихлорвиниловой трубы с внутренним диаметром 10,5 см, разрезанной на фрагменты длиной по 15 см. Каждая из пятнадцати колонн высотой 30 см состояла из двух таких скрепленных фрагментов. Были проведены два вида обработки, различающиеся количеством вносимого ила, а также контрольный

* Перевод статьи на русский язык А.В.Алексеенко

DOI 10.18454/PMI.2016.6.877

опыт. Осадки сточных вод были нанесены на почву и смешаны как при вспашке с образованием однородной смеси в приповерхностном горизонте мощностью 15 см.

План контрольного опыта и условные обозначения:

Символ	Материал
Z_0	Колонна 30 см, заполненная отходами известняка
D_0	Колонна 30 см, заполненная почвой без растительности
$(Z+D)_0$	Колонна 30 см, заполненная почвой без растительности на глубинах 0-15 см и отходами известняка на глубинах 15-30 см
D_3	Колонна 30 см, заполненная почвой без растительности, в верхних 15 см равномерно перемешанной с осадками сточных вод (дозировка 30 000 кг/га). Трехкратное повторение
D_9	Колонна 30 см, заполненная почвой без растительности, в верхних 15 см равномерно перемешанной с осадками сточных вод (дозировка 90 000 кг/га). Трехкратное повторение
$(Z+D)_3$	Колонна 30 см, заполненная почвой без растительности на глубинах 0-15 см и отходами известняка на глубинах 15-30 см. В верхних 15 см почва равномерно перемешана с осадками сточных вод (дозировка 30 000 кг/га). Трехкратное повторение
$(Z+D)_9$	Колонна 30 см, заполненная почвой без растительности на глубинах 0-15 см и отходами известняка на глубинах 15-30 см. В верхних 15 см почва равномерно перемешана с осадками сточных вод (дозировка 90 000 кг/га). Трехкратное повторение

Эксперимент выполнен с использованием двух видов отходов открытой добычи известняка, содержащих большое количество карбонатов кальция. Первый тип *Z* – измельченный известняк низкого качества, состоящий из крупнозернистого материала (массовая доля до 75 %) и песка. Второй тип *D* – отходы добычи известняка – чередующиеся неизвестковые породы и остатки снятого почвенного слоя. В отходах обычно велика доля гетерометрических валунов (до 60 %) и содержится больше глинистых материалов (около 25 %). Эти материалы были удобрены твердыми биологическими отходами. Характеристики применявшихся субстратов представлены ниже.

• Содержание гранулометрических фракций в испытанных почвообразующих породах, %:

Фракция	Глина	Ил	Песок
Z	15,40	16,00	68,60
D	21,37	26,00	52,63

• Физико-химические свойства применявшихся в опыте почвообразующих пород:

Показатель	*Z*	*D*
pH	8,30	8,90
Электропроводность, мкСм/см (при 25 ºС)	259,20	58,32
Содержание органического вещества, %	0,63	0,37
Содержание фосфора, мг/кг сухого вещества	2,05	2,10
Содержание кальция, г/кг сухого вещества	3,40	3,36
Содержание азота, %	0,03	0,02
Содержание карбоната кальция, %	45-75	55-70

Использованные в опыте твердые биологические отходы получены со станции очистки сточных вод «Аспе», расположенной недалеко от Аликанте на юго-востоке Испании. Перед компостированием осадок должен быть смешан с объемообразующим препаратом, поддерживающим структуру, улучшающим аэрацию и поглощение влаги, а также вносящим углерод. Состав и количество химических элементов в осадке сточных вод с водоочистной станции «Аспе» показаны ниже:

Компонент	Концентрация
Органический углерод, %	46,40
Азот по методу Кьельдаля, %	4,70
Фосфор, %	0,28
Калий, %	0,03
Кальций, %	0,11
Магний, %	0,08
Железо, г/кг сухого вещества	6,48
Медь, мг/кг сухого вещества	298,00
Цинк, мг/кг сухого вещества	868,00

DOI 10.18454/PMI.2016.3.877

Орошение. Для достижения наибольшей схожести между опытом и природными условиями почва в колоннах была восьмикратно орошена водопроводной водой. Первые пять поливов проводились каждые две недели, три заключительных полива – один раз в месяц. Поступление воды обеспечивалось либо поливным устройством, создающим короткий дождь, либо затоплением, при котором поверхность покрывалась водой, просачивающейся затем в почву.

Определение некоторых физических свойств почвообразующей породы. *Объемная плотность.* Измерение объемной плотности всегда является важным из-за ее большой изменчивости. Определение можно выполнять различными методами, но были применены два наиболее предпочтительных. Лучший способ определить плотность – отобрать определенный объем ненарушенной почвы и взвесить после высушивания при 105 °С и достижения постоянной массы. Для этого обычно применяют металлический цилиндр объемом приблизительно 100 мл. Почву извлекают, когда он до краев заполнен с обеих сторон, после этого пробу высушивают и взвешивают. Объем образца и цилиндра равны и известны. Плотность рассчитывают как отношение массы к объему. Главный недостаток этого способа – погрешность из-за наличия камней, поэтому его можно применять только в некаменистых почвах, которые, к сожалению, встречаются редко. Удобнее использовать другой метод: менее точный, но более простой. Способ заключается в отборе как можно более крупного почвенного агрегата (комка), его высушивании и взвешивании. Образец, обвязанный нитью, опускают в расплавленный парафин для покрытия водоотталкивающим слоем. После затвердевания комок взвешивают повторно и в восковой оболочке опускают в мерный цилиндр с известным количеством воды. Повышение уровня воды после погружения образца соответствует его объему. Таким путем устанавливаются обе величины, требующиеся для расчета плотности. Объем тонкого слоя парафина пренебрежимо мал, но и его можно оценить, зная плотность парафина и изменение массы образца после затвердевания. Главный недостаток метода состоит в том, что он не учитывает объем трещин, разделяющих агрегаты в почве. Однако при смачивании поры исчезают, и потому этим методом можно оценить свойства влажной почвы.

Агрегатная устойчивость. Определение процентной доли устойчивых агрегатов в почве было выполнено с помощью искусственного дождя по методу, описанному в работе [10].

Результаты и обсуждение. Объемная плотность и доля стабильных агрегатов рассматривались как физические свойства, способные измениться при внесении в почву таких органических удобрений как осадки сточных вод. При определении плотности рассчитывают соотношение массы высушенной в печи почвы и ее объема, включающего как комки, так и поровое пространство между ними. Масса зависит от плотности почвенных частиц (песок, ил, глина и органическое вещество) и их взаиморасположения. Плотность минеральных частиц составляет 2,5-2,8 г/см^3, у органических частиц она обычно не превышает 1,0 г/см^3 [12]. Объемная плотность – неустойчивая характеристика, которая меняется вместе со структурой почвы. Она может служить показателем уплотненности почвы и препятствий для роста корней [5, 12].

Сравнение почвообразующей породы без удобрений – отходов добычи известняка Z_0 и почвы без растительности (D_0) со смесью известняка с почвой $(Z + D)_0$ показало, что порода Z_0 имеет наименьшую объемную плотность, что логично при ее структуре с множеством воздушных пустот в колонне, понижающих соотношение массы и объема. Как видно из рис.1, внесение

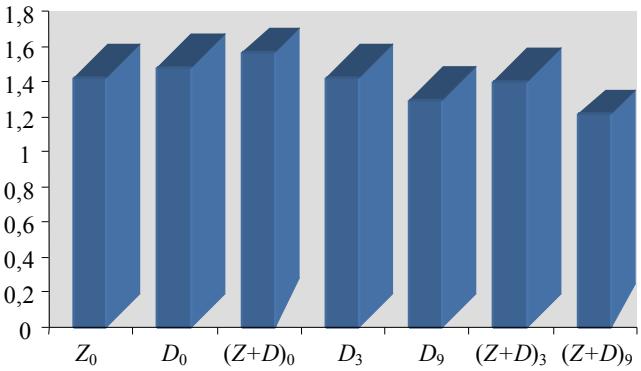


Рис.1. Объемная плотность (г/см^3) изученных почвообразующих пород

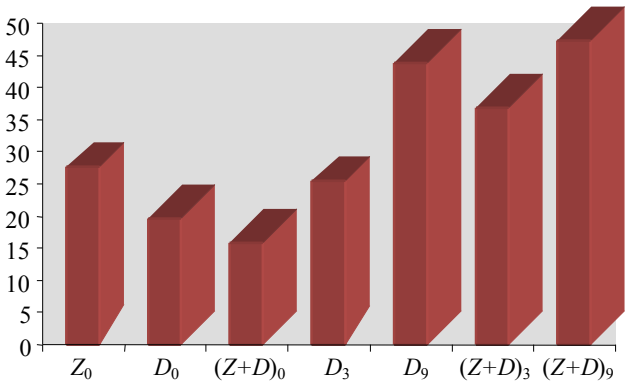


Рис.2. Агрегатная устойчивость (%) в изученных почвообразующих породах

DOI 10.18454/PMI.2016.6.877

осадка сточных вод снижает объемную плотность в испытанных почвообразующих породах, причем снижение усиливается по мере увеличения вносимой дозы ила.

Содержащееся в применяемых илах органическое вещество может улучшить структуру почвообразующих пород, создавая поры, снижающие объемную плотность. При большой дозе вносимого ила (90 000 кг/га) плотность достигает 1,4 г/см^3 – величины, рекомендованной министерством сельского хозяйства США [12] для суглинков и опесчаненных суглинков. Объемная плотность выше 1,6 г/см^3 может влиять на рост корней и даже задерживать его (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость роста корней от объемной плотности (г/см^3) при различной структуре почвы [12]

Структура почвы	Наилучшая объемная плотность	Объемная плотность, влияющая на рост корней	Объемная плотность, препятствующая росту корней
Пески, суглинистые пески	<1,60	1,69	>1,80
Опесчаненные суглинки, суглинки	<1,40	1,63	>1,80
Опесчаненные иловатые суглинки, суглинки, иловатые суглинки	<1,40	1,60	>1,75
Илы, пылеватые суглинки	<1,30	1,60	>1,75
Пылеватые суглинки, пылевато-иловатые суглинки	<1,40	1,55	>1,65
Песчаные глины, илистые глины, некоторые иловатые суглинки (35-45 % глины)	<1,10	1,49	>1,58
Глины (>45 % глины)	<1,10	1,39	>1,47

Агрегатная устойчивость – это мера восприимчивости комков почвы ко внешнему воздействию разрушительных сил. Почвенные агрегаты состоят из разнородных взаимосвязанных частиц [10]. Агрегаты, сохраняющие свою форму под воздействием влаги, называются водоустойчивыми. Чем выше содержание устойчивых агрегатов, тем меньше почва подвержена эрозии. Почвенные агрегаты возникают в итоге взаимодействия микробного сообщества с органическими и минеральными составляющими под влиянием растительных сообществ и развития экосистемы [5, 12]. Агрегирование почвы может меняться в разные сезоны или годы [10]. Агрегаты могут слипаться, распадаться и переформировываться со временем. Они повышают качество почвы: защитой содержащегося в комках органического вещества от воздействия воздуха и микробного разложения; снижением подверженности эрозии; ростом доступности воздуха и влаги (комки повышают число крупных пор), тем самым улучшая физические условия развития корневых систем и обитания почвенных организмов [5, 12].

На рис.2 показано, что в контрольных почвообразующих породах сравнительно мала доля устойчивых агрегатов. Применение ила повышает их число, причем рост заметно увеличивается при внесении большего количества удобрения (90 000 кг/га). Повышение содержания органики в почве приведет к улучшению многих ее свойств, среди которых можно особо выделить такие структурные характеристики как объемная плотность, устойчивость агрегатов, пористость и другие. Улучшение структуры почвы снижает ее уязвимость к таким процессам деградации как эрозия и переуплотнение. Тем не менее, ни в одном случае не удалось достичь величины, рекомендованной министерством сельского хозяйства США [12] и составляющей 65-70 % для почв с содержанием глины около 15 % (табл. 2).

Таблица 2

Доля водоустойчивых агрегатов при различных содержаниях органического вещества и глины [12]

Содержание органического вещества, %	Доля водоустойчивых агрегатов, %	Содержание глины, %	Доля водоустойчивых агрегатов, %
0,4	53	5	60
0,8	66	10	65
1,2	70	20	70
2,0	75	30	74
4,0	77	40	78
8,0	81	60	82
12,0	85	80	86

Примечание. Агрегатная устойчивость определена в 519 пробах почвы из сухих, полусухих и умеренно-влажных областей США и Канады.

DOI *10.18454/PMI.2016.3.877*

Учитывая концентрацию органического вещества в почвообразующей породе, содержание агрегатов должно составлять 53 % в колонне D_3 и 70 % в колонне D_9 [12].

Заключение. В результате опыта были достигнуты уменьшение объемной плотности и рост агрегатной устойчивости, что улучшило структуру почвы. В ходе эксперимента не удалось получить величин, рекомендованных министерством сельского хозяйства США. Необходимо учитывать, что со временем произойдет повышение агрегатной устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Albiach R.* Organic matter components and aggregate stability after the application of different amendments to a horticultural soil / R.Albiach, R.Canet, F.Pomares, F.Ingelmo // Bioresour Technol. 2001. Vol. 76. P. 125-129.

2. FAO. In IUSS (Ed.), World reference base for soil resources. Rome: ISRIC, 2006.

3. *Jordan M.M.* Sewage sludge application for soil reclamation of limestone quarries. Test in columns using a calcareous mineral rejection / M.M.Jordan, M.B.Almendro, S.Pina, F.García-Orenes, E.García-Sánchez, M.C.Sabater, J.Navarro, I.Gómez // Water management and soil conservation in semi-arid environments. INRA, Marrakech, 2006.

4. *Jordán M.M.* A classification of sediment types based on statistical multivariate techniques / M.M.Jordán, J.Mateu, A.Boix // Water Air Soil Pollut. 1998. Vol. 107. P. 91-104.

5. *Jordán M.M.* Bulk density and aggregate stability in technosols designed for ecological restoration of extractive activities / M.M.Jordán, M.A.Montero, E.García-Sánchez, F.García-Orenes // Fresenius Environmental Bulletin. 2014. Vol. 23. P. 2509-2513.

6. *Jordán M.M.* Environmental risk evaluation of the use of mine spoils and treated sewage sludge in the ecological restoration of limestone quarries / M.M.Jordán, S.Pina, F.García-Orenes, M.B.Almendro-Candel, E.García-Sánchez // Environ Geol. 2008. Vol. 55. P. 453-462.

7. *Novo L.A.B.* The potential of Salvia vernenaca for Phytoremediation of Copper Mine Tailing Amended with Technosol and compost / L.A.B.Novo, E.F.Covelo, L.González // Water Air Soil Pollut. 2013. Vol. 224. P. 1513.

8. *Pond A.P.* Accelerated weathering of biosolid-amended copper mine tailings / A.P.Pond, S.A.White, M.Milczarek, T.L.Thompson // Environ Qual. 2005. Vol. 34. № 4. P. 1293-1301.

9. *Ram L.C.* Management of mine spoils for crop productivity with lignite fly ash and biological amendments / L.C.Ram, N.K.Srivasta, R.C.Tripathi, S.K.Jha, A.K.Sinha, G.Singh, V.Manoharan // Environ Manag. 2006. Vol. 79. № 2. P. 173-187.

10. *Roldán A.* An incubation experiment to determinate factors involving aggregation changes in an arid soil receiving urban refuse / A.Roldán, F.García-Orenes, A.Lax // Soil Biol Biochem. 1994. Vol. 26 P. 1699-1707.

11. *Tedesco M.J.* Reclamation of spoil and refuse material produced by coal mining using bottom ash and lime / M.J.Tedesco, E.C.Teixeira, C.Medina, A.Bugin // Environ Technol. 1999. Vol. 20. № 5. P. 523-529.

12. USDA. Criterios para la evaluación de la calidad ambiental del suelo. Manual de trabajo de campo en Edafología. Informe Técnico, 1999.

***Авторы*: М.М.Хордан,** *доктор наук*, *доцент*, *manuel.jordan@umh.es* (*Университет Мигеля Эрнандеса*, *Эльче*, *Испания*), **Дж.Бек,** *доктор наук*, *профессор*, *jaumebechborras@gmail.com* (*Университет Барселоны*, *Барселона*, *Испания*), **Э.Гарсия-Санчес,** *доктор наук*, *доцент*, *ernesto.garcia@umh.es* (*Университет Мигеля Эрнандеса*, *Эльче*, *Испания*), **Ф.Гарсия-Оренес,** *доктор наук*, *доцент*, *fuensanta.garcia@umh.es* (*Университет Мигеля Эрнандеса*, *Эльче*, *Испания*).

Статья принята к публикации 1.11.2016.