



УДК: 631.425

## БИОУГОЛЬ И ГЛУБОКОЕ БЕЗОТВАЛЬНОЕ РЫХЛЕНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ПАХОТНЫХ ПОЧВ И СЕКВЕСТРАЦИИ УГЛЕРОДА

**Шварцева Ольга Сергеевна** 

ведущий научный сотрудник, канд. геол.-мин. наук

e-mail: [o.s.shvarceva@utmn.ru](mailto:o.s.shvarceva@utmn.ru)

**Финк Арина Николаевна** 

научный сотрудник

e-mail: [a.n.fink@utmn.ru](mailto:a.n.fink@utmn.ru)

**Юртаев Андрей Александрович** 

профессор, канд. геогр. наук

e-mail: [a.a.yurtaev@utmn.ru](mailto:a.a.yurtaev@utmn.ru)

Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования деградации пахотных почв лесостепи Зауралья и оценки эффективности синергетической технологии безотвального глубокорыхления в сочетании с внесением биоугля. На агрочернозёмах и агросерых почвах опытного хозяйства Курганского государственного университета зафиксировано переуплотнение (до 1,59 г/см<sup>3</sup>) и неудовлетворительный агрегатный состав. Пенетрометрические данные показали, что комбинация глубокорыхления и биоугля (5 т/га) обеспечивает статистически значимое ( $p < 0,05$ ) снижение сопротивления в зоне плужной подошвы (10–30 см). Ключевой принцип технологии — синергия: глубокорыхление устраняет механическое уплотнение, а биоуголь формирует искусственную агрегацию, стабилизирующую структуру до восстановления собственных почвенных агрегатов. Параллельно реализуется климатический проект с двойной сертификацией (ПНСТ 901–2023 / Verra VM0044). Предложенный подход позволяет интегрировать технологии восстановления в текущий сельскохозяйственный процесс без остановки производства.

**Ключевые слова:** деградация почв, уплотнение почвы, биоуголь, глубокорыхление, секвестрация углерода, климатический проект, агрегация почв, устойчивое земледелие.





## AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

**Abstract.** The paper presents results of a study on degradation of arable soils in the Trans-Urals forest-steppe and the efficacy of a synergistic technology combining subsoiling without inversion with biochar application. Agrochernozems and agro-gray soils at the experimental farm of Kurgan State University showed compaction up to  $1.59 \text{ g/cm}^3$  and poor aggregate composition. Penetrometry data demonstrated that the combination of subsoiling and biochar (5 t/ha) significantly ( $p < 0.05$ ) reduces penetration resistance in the plowpan zone (10–30 cm). The core principle is synergy: subsoiling eliminates mechanical compaction while biochar creates artificial aggregation that stabilizes structure until native soil aggregates recover. A climate project with dual certification (PNST 901–2023 / Verra VM0044) is implemented in parallel. The approach enables integration of restoration technologies into ongoing agricultural production without halting operations.

**Keywords:** soil degradation, soil compaction, biochar, subsoiling, carbon sequestration, climate project, soil aggregation, sustainable agriculture.

**Annotatsiya.** Maqolada G'arbiy Sibirning o'rmon-dasht zonasidagi dehqonchilik tuproqlarining degradatsiyasi va biocho'g'al qo'llash bilan chuqur haydashesiz yumshatish texnologiyasining samaradorligini baholash natijalari keltirilgan. Agro qora tuproqlar va agro kulrang tuproqlar zichlanishi  $1,59 \text{ g/sm}^3$  gacha yetgan va agregat tarkibi qoniqarsiz ekanligi aniqlangan. Penetrometriya ma'lumotlari shuni ko'rsatdiki, chuqur yumshatish va biocho'g'al (5 t/ga) kombinatsiyasi plugli taglik zonasida (10–30 sm) qarshilikni statistik jihatdan sezilarli darajada ( $p < 0,05$ ) kamaytiradi. Shu bilan birga, PNST 901–2023 va Verra VM0044 asosida ikki tomonlama sertifikatlash imkoniyatiga ega iqlim loyihasi amalga oshirilmoqda. Ushbu yondashuv dehqonchilik ishlab chiqarishni to'xtatmasdan tuproq tiklash texnologiyalarini joriy etish imkonini beradi.

**Kalit so'zlar:** tuproq degradatsiyasi, tuproq zichlashuvi, biocho'g'al, chuqur yumshatish, uglerod sekvstratsiyasi, iqlim loyihasi, barqaror dehqonchilik.

### ВВЕДЕНИЕ

Вовлечение почв в сельскохозяйственный оборот приводит к изменению их агрофизического состояния [1]. Переуплотнение пахотных горизонтов вследствие механического воздействия нарушает водно-воздушный режим и ограничивает развитие корневой системы [2]; увеличение плотности на  $0,1 \text{ г/см}^3$  снижает урожайность зерновых на 10–15 % [3]. Мониторинг агрочернозёмов и агросерых почв в Курганской области выявил плотность в слое 10–30 см до  $1,51–1,59 \text{ г/см}^3$  и коэффициенты структурности менее 0,67, характеризующие агрегатное состояние как неудовлетворительное [4].

Между тем почвы — крупнейший наземный резервуар углерода (1500–2000 Гт С в верхнем метре). Увеличение почвенного органического углерода (ПОУ) способно обеспечить отведение 0,79–1,54 Гт С/год из атмосферы [5, 6], однако интенсивная обработка и эрозия продолжают вести к потерям ПОУ [7].





## AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

Предложенный подход базируется на принципе синергии: глубокое безотвальное рыхление оперативно устраняет плужную подошву, а биоуголь, внесённый в разрыхлённый слой, выполняет функцию «искусственного агрегирующего агента». Его высокая пористость и поверхностная активность стимулируют формирование макроагрегатов [8, 9], стабилизируя структуру почвы на период восстановления собственных агрегатов за счёт корневых экссудатов и микробной активности [10]. Одновременно биоуголь обеспечивает долговременную секвестрацию углерода благодаря термической стабильности [11, 12].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на опытных полях Курганского государственного университета (Кетовский муниципальный округ, лесостепь Зауралья). Объекты — среднесуглинистые агрочернозёмы и легкосуглинистые агросерые почвы. Содержание органического вещества — 4,0 и 2,9 % соответственно; содержание песчаной фракции ( $>0,05$  мм) — более 59 и 70 %. Плотность сложения измеряли методом режущего кольца в трёх временных точках (апрель–август 2025 г.), агрегатный состав — методом сухого рассева по Савинову.

Полевой опыт заложен в октябре 2025 г. Варианты: контроль (C0), глубокорыхление без мелиорантов (K), глубокорыхление + биоуголь 5 т/га (T5), глубокорыхление + смесь активированного и неактивированного биоугля 5 т/га (T5A), глубокорыхление + биоуголь 10 т/га (T10). Сопротивление пенетрации измеряли пенетрологгером Eijkelkamp 06.15.SA (конус  $1 \text{ см}^2$ ,  $60^\circ$ ) через две недели после обработки. Статистика: ANOVA + парный t-тест.

Климатический проект реализуется по принципу dual-ready: национальная методология ПНСТ 901–2023 [16] + международные стандарты Verra VM0044 [17] и Puro Biochar (Edition 2025).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Исходное состояние почв.** Плотность сложения обоих типов почв в слое 10–30 см стабильно превышала  $1,50 \text{ г/см}^3$  (таблица 1), приближаясь к критическому порогу  $1,6 \text{ г/см}^3$  [3]. Коэффициенты структурности составили 0,42–0,51 для агрочернозёма и 0,59–0,94 для агросерой почвы [4], что подтверждает деградацию структуры.

Таблица 1

Плотность сложения почвы, $\text{г/см}^3$				
Тип почвы	Глубина, см	18.04	27.05	01.08
Агрочернозём	0–10	1,33	1,42	1,33
	10–30	1,51	1,55	1,50
Агросерая	0–10	1,50	1,55	1,47
	10–30	1,53	1,49	1,59





## AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

**Мелиоративный эффект.** Достоверные различия между вариантами выявлены в горизонте 10–30 см — зоне плужной подошвы (таблица 2). На агрочернозёмах внесение биоугля 5 т/га (Т5,  $p = 0,028$ ; Т5А,  $p = 0,008$ ) обеспечило значимое снижение сопротивления пенетрации. Наибольший эффект дала смесь активированного и неактивированного биоугля (Т5А: медиана 1,25 МПа vs 2,90 МПа на контроле). При увеличении дозы до 10 т/га дополнительного эффекта не получено ( $p > 0,05$ ), что согласуется с нелинейным характером отклика [12]. Само по себе глубокорыхление (К) не дало достоверного снижения сопротивления.

Таблица 2

**Сопротивление пенетрации, слой 10–30 см, агрочернозём**

Вариант	Медиана, МПа	IQR, МПа	n	p (vs C0)
C0	2,90	2,60–3,80	4	—
К	2,15	1,50–2,90	4	0,397
Т5	2,10	1,00–2,50	4	0,028*
Т5А	1,25	0,80–2,23	4	0,008**
Т10	2,60	1,60–3,33	8	0,294

\* —  $p < 0,05$ ; \*\* —  $p < 0,01$  по *t*-тесту.

На агросерой почве все варианты с глубокорыхлением достоверно отличались от контроля ( $p < 0,01$ ), но между дозами биоугля различий не выявлено ( $p > 0,05$ ). Это закономерно: на лёгких почвах механическое разрушение плужной подошвы — быстрый и доминирующий фактор; роль биоугля как агрегирующего агента будет нарастать в среднесрочной перспективе [8, 10, 13].

**Синергия и климатический проект.** Полученные результаты подтверждают синергетический принцип технологии: глубокорыхление обеспечивает немедленный эффект разуплотнения, а биоуголь — среднесрочную стабилизацию структуры и долгосрочную секвестрацию углерода.

Базовая линия климатического проекта зафиксировала запасы ПОУ в слое 0–30 см: ~54 т С/га (агрочернозёмы) и ~38 т С/га (агросерые почвы). При массовой доле углерода в биоугле 79,9 % и устойчивости ~80 % прогнозируемое брутто-удержание составляет 3,2–6,4 т С/га; индуцированный прирост SOC — 0,15–0,50 т С/га·год [5, 18]. Методологическая структура базируется на ПНСТ 901-2023 [16] с элементами VM0044 [17] по принципу dual-ready, обеспечивая совместимость с Реестром углеродных единиц РФ и международными рынками.



### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Диагностика агрочернозёмов и агросерых почв Зауралья подтвердила выраженную деградацию: плотность до  $1,59 \text{ г/см}^3$ , неудовлетворительная структурность.

2. Подтверждена эффективность синергетической технологии: глубокорыхление оперативно устраняет плужную подошву, а биоуголь (5 т/га) усиливает эффект на агрочернозёмах через формирование искусственной агрегации. На лёгких почвах эффект биоугля требует мониторинга.

3. Технология позволяет проводить восстановление почв без остановки сельскохозяйственного производства, что критически важно для регионов с интенсивным земледелием.

4. Интеграция в систему двойной сертификации (ПНСТ 901-2023 / VM0044) обеспечивает верификацию углеродного эффекта на национальном и международном уровне.

5. Рекомендуется адаптация подхода для аридных и семиаридных регионов Центральной Азии, где проблемы уплотнения ирригационных почв и дефицита органического вещества имеют сходную природу.

**Финансирование:** исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Тюменский карбоновый полигон» (FEWZ-2024-0016).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Еремина Д.В., Груздева Н.А., Еремин Д.И. Сравнительная оценка структурно-агрегатного состава тёмно-серых лесных почв лесостепной зоны Зауралья // Вестник КрасГАУ. — 2019. — № 12 (153).

2. Labelle E.R., Poltorak B.J., Jaeger D. The role of brush mats in mitigating machine-induced soil disturbances // Canadian Journal of Forest Research. — 2019. — Vol. 49, No. 2. — P. 164-178.

3. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Экология почв. Часть 2. — Ростов-на-Дону: УПЛ РГУ, 2004. — 54 с.

4. Финк А.Н. и др. Биоуголь и глубокорыхление как инструменты восстановления структуры почв и реализации агроклиматического проекта // Мат-лы V Межд. конф. «Тенденции развития агрофизики». — СПб.: ФГБНУ АФИ, 2025. — С. 433.

5. Amelung W. et al. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy // Nature Communications. — 2020. — Vol. 11. — Art. 5427.

6. Bossio D.A. et al. The role of soil carbon in natural climate solutions // Nature Sustainability. — 2020. — Vol. 3. — P. 391-398.

7. Villat J., Nicholas K.A. Quantifying soil carbon sequestration from regenerative agricultural practices // Frontiers in Sustainable Food Systems. — 2023. — Vol. 7. — Art. 1234108.



---

## AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

---

8. Lee M.-H. et al. Effects of biochar on soil aggregation and distribution of organic carbon fractions in aggregates // *Processes*. — 2021. — Vol. 9, No. 8. — Art. 1431.
9. Бучкина Н.П. и др. Изменение биологических и физических параметров почв после внесения биоугля // *Сельскохозяйственная биология*. — 2017. — № 3. — С. 471–477.
10. Joseph S. et al. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms // *GCB Bioenergy*. — 2021. — Vol. 13. — P. 1731–1764. — DOI: 10.1111/gcbb.12885.
11. Blanco-Canqui H. Does biochar application alleviate soil compaction? // *Geoderma*. — 2021. — Vol. 404. — Art. 115317.
12. Huang C. et al. Effects of biochar on soil N<sub>2</sub>O emissions, aggregate stability and nutrients under subsoiling // *J. Agriculture and Food Research*. — 2025. — Vol. 23.
13. Islam M.U. et al. Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis // *Land Degradation & Development*. — 2021. — Vol. 32. — P. 3354–3371. — DOI: 10.1002/ldr.3893.
14. Chen W. et al. Effects of tillage and biochar on soil physiochemical and microbial properties // *Frontiers in Microbiology*. — 2022. — Vol. 13. — Art. 929725.
15. Yang P. et al. Soil compaction prevention, amelioration and alleviation measures // *Land*. — 2022. — Vol. 11, No. 5. — Art. 645.
16. ПНСТ 901–2023. Методика реализации климатических проектов по оценке запасов органического углерода в почве на пахотных землях. — М.: Стандартинформ, 2023.
17. Verra. VM0044 Methodology for Biochar Utilization in Soil and Non-Soil Applications, v1.1. — Washington, DC: Verra, 2024.
18. Ma Y. et al. Global crop production increase by soil organic carbon // *Nature Geoscience*. — 2023. — Vol. 16. — P. 1159–1165.