

УДК 631.417.2

Характеристика методов выделения фракций почвенного органического вещества и их использование для оценки гумусового состояния почв

Прохоров А.А.

Российский государственный аграрный университет МСХА им. К.А. Тимирязева

Аннотация

В данной работе был рассмотрен вопрос, связанный с разработкой и модификацией методики оценки гумусового состояния почв. На примере типичных и обыкновенных черноземов Краснодарского края охарактеризованы перераспределения пулов лабильных фракций углерода в процессе сельскохозяйственного использования земель. На основе полученных данных были установлены наиболее информативные индикаторные показатели в рамках анализируемых лабораторных методов.

Дано теоретическое обоснование и предложена оценочная шкала обеспеченности почв Северо-Кавказского региона фракцией перманганат-окисляемого органического вещества, а также обоснована значимость информационной оценки гумусового состояния почв.

Ключевые слова: ПОЧВЕННОЕ ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО, ЛАБИЛЬНЫЕ ФРАКЦИИ, ГУМУСОВОЕ СОСТОЯНИЕ, АКТИВНЫЙ УГЛЕРОД

Введение

На рубеже XXI века одними из основных проблем человечества выступают процессы глобальных изменений в природной среде, связанные как с техногенными процессами, так и с естественной изменчивостью и динамикой биосферы в целом [1]. Наряду с такими проблемами как: дефицит энергии и продовольствия, сокращение видового биоразнообразия, деградации ландшафтов на фоне радикального и «потребительского» землепользования стоит проблема, связанная с дегумусированием почв агроландшафтов [2].

Изучение вопросов, связанных с трансформацией компонентов нативного органического вещества, является первостепенной задачей для создания новых и оптимизации современных концепций, направленных на поддержание оптимального режима природопользования и дальнейшего рационального использования почвенного органического вещества (ПОВ) как природного ресурса.

Наличие стабильного, биологически активного и физически лабильного почвенного органического вещества влияет на поддержание оптимальных кислотно-щелочных условий, органические вещества учувствуют в структурообразовании. В современных исследованиях значительное внимание уделяется процессам секвестрации углерода и динамике ПОВ в биосфере [3]. Однако ПОВ также является важной основой для производственного процесса так как выступает в роли одного из факторов устойчивого функционирования любого агроландшафта [1, 4–7].

Объединение информации разных уровней является большой проблемой. Сопоставление данных дистанционного зондирования с информацией об участках в качестве основы для построения математических моделей на ландшафтном уровне и данными о проявлении процессов с учетом вертикального разрешения является достаточно сложной процедурой в связи с грубой экстраполяцией и весомой ограниченностью данных [8].

В свою очередь на фоне глобальных процессов, протекающих в биосфере, вопросы связанные с изменениями качества и количества почвенного органического вещества во всех почвенно-экологических зонах, а в особенности в критических, прогноз уровня содержания углерода с учетом трендов изменчивости факторов внешней среды остаются наиболее значимыми в рамках исследований в области фундаментального почвоведения [3, 9, 10].

Объекты и методы

Для проведения исследований было выбрано несколько ключевых участков на территории Краснодарского края, представляющих собой типичные для данного региона агроландшафты с каждого, из которых были отобраны почвенные образцы с глубины 0–30 см для дальнейших лабораторных исследований, а также путем закладки разрезов и полуразрезов были описаны морфологические особенности местных почв.

В качестве сравнения с фоновыми условиями, пробы также были отобраны по периметру полезащитных насаждений, всего по 10 проб на один участок (по 5 внутри контуров полей и по 5 по лесополосам). Дополнительно было отобрано 147 образцов - в среднем по 50 на один участок, для проведения верификации, используемого в рамках данной работы перманганатного метода.

Почвенный покров участка №1 представлен – чернозёмами типичными мощными и сверхмощными тяжелосуглинистыми и легкоглинистыми на тяжелых карбонатных суглинках и легких глинах, в неконтрастных комбинациях с луговато-черноземными почвами и своими смытыми аналогами, приуроченными, как правило, к южным склонам крутизной не более 1-2°. Почвенный покров участков №2, 3 представлен черноземами обыкновенными мощными и среднемощными тяжелосуглинистыми на тяжелых карбонатных суглинках и глинах.

Выделение физических фракций производилось путем гранулоденсиметрического фракционирования с использованием йодида калия ($\rho=1,60, 2,00 \pm 0,02$ г/см³) в качестве тяжелой жидкости. Методика была модифицирована сотрудниками ИЦПЭИ РГАУ-МСХА, за основу взят метод из работы [1, 9]. В основе метода лежит сегментация фракций органического вещества по плотности. Фракция f.ПОМ <1.6 г/см³ рассматривается как эквивалент легкоразлагаемого органического вещества (ЛОВ) [11].

Легкоокисляемый углерод - Readily oxidizable carbon (ROC) определяли в агрегатах 1-0,25 мм и <0,25 мм путем мокрого озонления пробы в присутствии (K₂Cr₂O₇: H₂SO₄ (1.86) - 1:1, углерод водногидролизующихся фракций cold water carbon, hot water carbon (CWC) и (HWC) в мг в соответствующих вытяжках [12] согласно ЦВ 3.01.17-01 «А», содержание Permanganate oxidizable carbon (ПОХС) устанавливали согласно методике предложенной в работе [13]. В основе метода положена обработка почвы 0,02 н. р-ом KMnO₄, с последующим измерением оптической плотности раствора (D), при этом последняя будет тем больше, чем меньшее количество углерода было окислено за период экспозиции.

Исследования проводились при поддержке и с использованием научного оборудования учебно-методического центра коллективного пользования "Сервисная лаборатория комплексного анализа химических соединений" РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева.

Все определения проводили в смешанном образце в трех повторностях, показатели принимали идентичными при $\rho=0,95$. В дальнейшем для проведения статистической обработки данных: проверки типа распределения, установления корреляционных зависимостей и построения модели было использовано ПО «STATISTICA» 10.0

В дальнейшем исходя из уровня содержания органического вещества оксидиметрической (перманганатной) фракции была построена оценочная функция [10], для чего дополнительно также было проведен анализ перманганатным методом для 147 образцов, отобранных с глубины 0–20 см с участков. Для построения функции были рассчитаны показатели стандартного отклонения (σ) и центра распределения (μ), при этом для определения функции оценки использовалась функция кумулятивного нормального распределения:

$$p=f(x,\mu,\sigma)=\frac{1}{2\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{+\infty}e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}dx \quad (1)$$

Где:

p – вероятность (от 0 до 1) того, что измеренное x будет попадать в заданный интервал;

σ – стандартное отклонение;

μ – среднее значение (центр распределения данных).

Данный подход разработки оценочных функций основан на том, что размах данных охватывает весь спектр свойств почв на локальном участке. Для построения функции и ее стандартизации величину плотности вероятностей (p) умножали на 100, переводя в безразмерную оценку (% баллов в частном распределении). При этом было выделено 5 звеньев по содержанию фракция в мг/кг или % в шкале бальной оценки: очень низкое 0–20 баллов, низкое 20–40 баллов, среднее 40–60 баллов, оптимальное 60–80 баллов и высокое 80–100 баллов. При этом, используя данный подход, были установлены функции качества для: черноземов, используемых в сельскохозяйственном производстве (Field), участков, отведенных под лесополосы (Forest), в целом для всех угодий по усреднению показателя (Mean).

Результаты и обсуждение

Оксидиметрические фракции

Величина массового содержания РОХС варьировала в диапазоне от 564 мг/кг до 1566 мг/кг и в среднем составляла 1,1–2,0% от ROC. Характеризуя распределение данных

следует отметить, что медиана и мода соответствовали значениям 945 мг/кг и 1001 мг/кг. Верхний и нижний квартили при этом соответствовали значениям 1194 мг/кг и 812 мг/кг. При этом на участках лесополосы наблюдалось существенно большее количество углерода.

Величина массового содержания ROC по разным гранулометрическим фракциям (1-0,25 мм и <0,25 мм), как правило, была идентична и попадала в доверительный интервал для среднего при уровне значимости $p=0,05$, что свидетельствует о том, что для пробы 1-0,25 и 0,25 мм, тщательно очищенной от корней растений, величина пула Readily oxidizable carbon будет идентична и в дальнейшем для оценки гумусового состояния почв можно использовать лишь один из данных показателей. Величина ROC <0,25 мм варьировала в диапазоне от 3,2 % до 8,3%. Идентичная тенденция, на участках лесополосы наблюдалось существенно большее количество углерода этой фракции.

Для фракции РОХС в дальнейшем была построена оценочная функция (рис. 1).

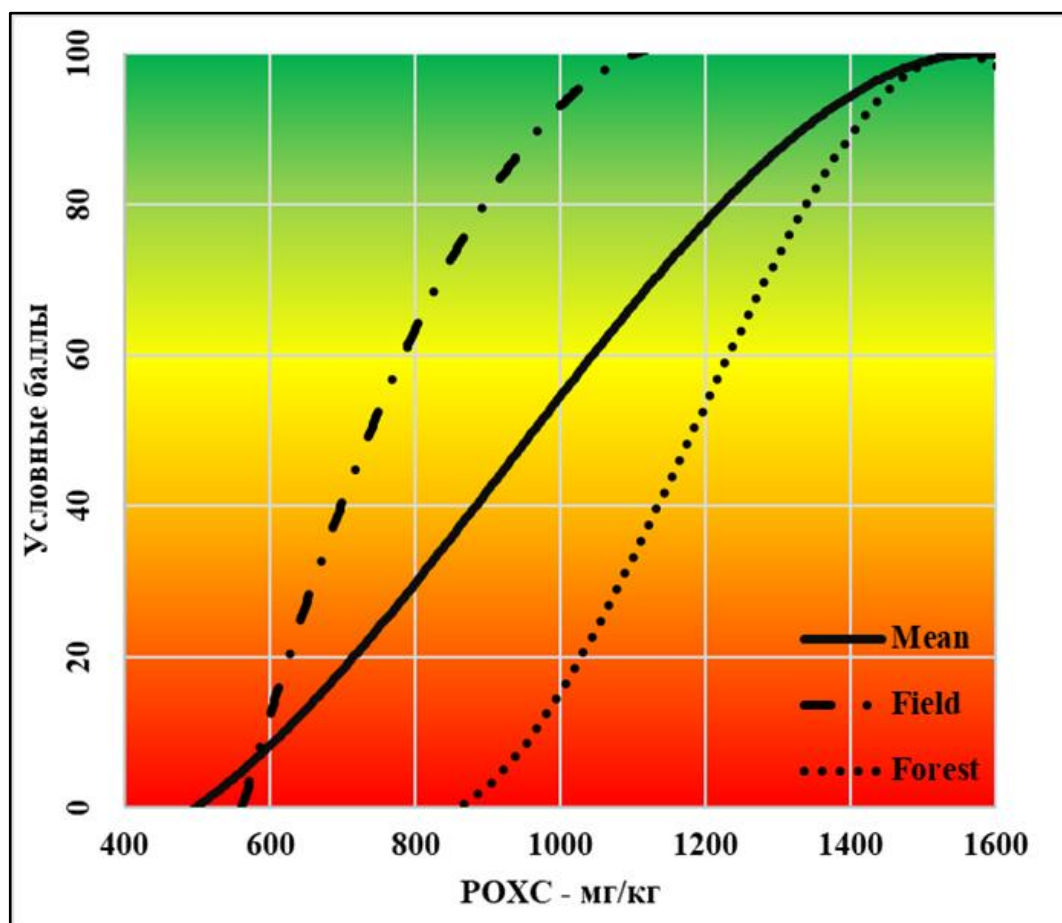


Рис. 1. Оценочная функция распределения по фракции РОХС

Подсчет баллов и составление шкалы было обусловлено тем, что гипотеза о соответствии данных закону нормального распределения была подтверждена с уровнем значимости $p=0,05$, что делает возможным проведение построения оценочной функции [10].

При этом аппроксимация кривой для участков разного тип землепользования имела следующий вид:

1) РОХС (Перманганатная фракция)

$$\text{Mean } y = y = -1e-07x^3 + 0,0003x^2 - 0,1384x + 11,401$$

$$\text{Field } y = y = -0,0003x^2 + 0,6298x - 269,38$$

$$\text{Forest } y = y = -5e-07x^3 + 0,0018x^2 - 1,9019x + 635,66$$

В соответствии с данной оценочной схемой были выделены 5 классов обеспеченности почвы «активным» углеродом (табл. 1):

Таблица 1. Классы обеспеченности по РОХС, мг/кг

Баллы	Класс	Field	Forest	Mean
0-20	Очень низкая (I)	< 630	< 1050	< 710
21-40	Низкая (II)	631-700	1051-1130	711-870
41-60	Средняя (III)	701-795	1131-1225	871-1030
61-80	Оптимальная (IV)	796-840	1226-1330	1030-1220
>80	Высокая (V)	> 840	> 1330	> 1220

В соответствии с тем, что полученные данные подчиняются закону нормального распределения, то большая часть данных принадлежит диапазону « $\mu-\sigma$ », охвату средней части графического отображения. Стоит отметить, что усреднение уровней содержания РОХС, использованное в данном подходе для таких контрастных объектов как лесополоса и агроландшафт, возможно только в том случае, если ежегодные уровни поступления органического вещества характеризуются идентичными трендами.

На основании данных по классам обеспеченности была составлена таблица 2 по обеспеченности участка «активным» углеродом на уровне класса:

Таблица 2. Распределение участков по обеспеченности РОХС

Участок	Содержание, мг/кг	Класс «Field»	Класс «Forest»	Класс «Mean»
Участок-1 (А ^с) Чернозем типичный 0–30 см	896	Высокая	-	Средняя
	662	Низкая	-	Очень низкая
	659	Низкая	-	Очень низкая
	724	Средняя	-	Низкая
	770	Средняя	-	Низкая
Участок-1 (Л) Чернозем типичный 0–30 см	1338	-	Высокая	Высокая
	1252	-	Оптимальная	Высокая
	1566	-	Высокая	Высокая
	901	-	Очень низкая	Средняя
	1070	-	Низкая	Оптимальная
Участок-2 (А ^к) Чернозем обыкновенный 0–30 см	1124	Высокая	-	Оптимальная
	850	Высокая	-	Низкая
	906	Высокая	-	Средняя
	844	Высокая	-	Низкая
	825	Оптимальная	-	Низкая
Участок-2 (Л) Чернозем обыкновенный 0–30 см	1163	-	Средняя	Оптимальная
	1080	-	Низкая	Оптимальная
	1450	-	Высокая	Высокая
	1131	-	Средняя	Оптимальная
	1321	-	Оптимальная	Высокая
Участок-3 (А ^к) Чернозем обыкновенный 0–30 см	819	Оптимальная	-	Низкая
	712	Средняя	-	Низкая
	812	Оптимальная	-	Низкая
	564	Очень низкая	-	Очень низкая
	676	Низкая	-	Очень низкая
Участок-3 (Л) Чернозем обыкновенный 0–30 см	1194	-	Средняя	Оптимальная
	1122	-	Низкая	Оптимальная
	985	-	Очень низкая	Средняя
	1327	-	Оптимальная	Высокая
	1260	-	Оптимальная	Высокая

Примечание: А^к- предшественник кукуруза; А^с-предшественник сахарная свекла; Л- лесополоса.

Таким образом, для пашни участка №1 предшественником на котором выступает сахарная свекла уровень содержания «активного» углерода по шкале «Mean» соответствует преимущественно низкому и очень низкому классу, в северной части поля на небольшом выположенном участке в нижней части склона - соответствует среднему уровню, превышая величину 876 мг/кг для почв, отведённых под пашню. Для участков №2 и №3 характерна дифференциация по классам обеспеченности, при этом на участке №3 обеспеченность почвы «активным» углеродом была значительно ниже, на уровне 0–40 баллов по условной

шкале оценки, в то время как количественные показатели по участку №2 попадали преимущественно в диапазон 30–50 баллов по шкале оценки «Mean».

На участках отведенных под лесополосы в большинстве случаев бал по оценочной шкале был выше, чем 50 ед., и по диаграмме распределения «Mean» участки лесополос попадали на уровень III–V класса обеспеченности.

Водногидролизуемые фракции

Фракции HWC и CWC характеризовались низкой воспроизводимостью. Вариация по содержанию данных фракций для одного образца внутри повторности в некоторых случаях составляла > 85% (от 37 до 302 мг/кг) для HWC и 80% для CWC (от 16 до 126 мг/кг). Характеризуя распределение данных следует отметить, что медиана и мода соответствовали значениям 109 мг/кг и 132 мг/кг для HWC и 34 мг/кг, и 42 мг/кг для CWC. Верхний и нижний квартили при этом соответствовали значениям 181 мг/кг и 73 мг/кг для HWC и 26 мг/кг, и 41 мг/кг для CWC. За счет существенной изменчивости данных (включая изменчивость в повторностях при измерениях), а также отсутствие закономерностей в изменчивости при рассмотрении проб, отобранных на участках с разным землепользованием (лесополоса, агроландшафт) и разными предшественниками (сахарная свекла, кукуруза на зерно), использование этих данных в первичном виде без факторного преобразования не дает представления об изменчивости лабильной части органического вещества почвы.

Возможно, в данной модификации с фотометрическим окончанием и измерении показателя химического поглощения кислорода в растворе, метод сработал некорректно и требует доработки, что будет учтено в дальнейших исследованиях. Также не исключено то, что были факторы, которые не были учтены и во временном отрезке: отбор→пробоподготовка→проведение анализа и были упущены ограничения, которые повлияли на итоговые цифры и достоверность результатов.

Денситометрические фракции

Величина процентного содержания f.POM <1,6 г/см³ варьировала в диапазоне от 0,16 % до 1,64 %, что соответствует величине 1600 и 16400 мг/кг и варьирует в диапазоне 2,9 и 27,7 % от ROC. При этом на участках лесополосы наблюдалось существенно больше количество углерода f.POM <1,6 г/см³. Оценка корреляционных связей позволяет судить о тесной зависимости между фракциями f.POM <1,6 г/см³ и POXC при значении

коэффициента корреляции Пирсона $R=0,68$, а также с величиной ROC при значении коэффициента Пирсона корреляции $R=0,75$. На участках лесополос наблюдается закономерное повышение уровня содержания легкой денситометрической фракции.

Заключение

При формировании агроландшафтов происходит качественное перераспределение ПОУ по функциональным пулам. Сокращается доля наиболее подвижных фракций (CWC, HWC, POXC, $f.POM < 1,6 \text{ г/см}^3$). Содержание углерода фракции POXC в агропочвах в среднем по выборке составило 790 мг/кг в то время как для почв лесополос эта величина находилось на уровне 1211 мг/кг на всех исследуемых участках Углерод фракции POXC сильно коррелирует с другими фракциями, в большей степени это выражено для $f.POM < 1,6 \text{ г/см}^3$ и ROC ($R = 0,68$ и $0,75$) соответственно.

Фракции CWC и HWC в целом являются достаточно изменчивыми и могут отражать тонкие изменения в системе ПОУ, что также не раз подтверждалось в исследованиях других авторов [8, 13], однако данные показатели отличались низкой воспроизводимостью и достаточно высокой вариацией внутри повторностей по вариантам. (от 30 до 90%), в то время как фракция POXC в значительной степени коррелирующая с $f.POM < 1,6 \text{ г/см}^3$ и ROC ($R=0,68/0,75$) не характеризовалась корреляционной зависимостью с водногидролизруемыми фракциями ($R=0,24/0,29$).

Фракция POXC очень хорошо отражает изменчивость содержания $f.POM < 1,6 \text{ г/см}^3$ и является хорошим предиктором для прогнозирования доли легкой денситометрической фракции. Применение таких математических моделей для прогнозирования ЛОВ на практике может существенно облегчить проведение лабораторной работы, а также снизить денежные затраты на анализ одного образца.

Список использованных источников:

1. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. - М.: Издательство ГЕОС, 2015. – 233 с. – ISBN 978-5-89118-702-3. – EDN VQNCVL.
2. Alfred E. Hartemink, Martin H. Gerzabek, Rattan Lal, and Kevin Mc.Sweeney «Soil Carbon Research Priorities» // ISBN 978-3-319-04083-7; DOI 10.1007/978-3-319-04084-4 Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London / 2014.

3. Hartemink AE (2006) Assessing soil fertility decline in the tropics using soil chemical data. *Adv Agron* 89:179–225.

4. Борисов Б.А. (2008). Легкоразлагаемое органическое вещество целинных и пахотных почв зонального ряда европейской части России. Москва: 03.00.27: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Ганжара Н.Ф., Байбеков Р.Ф., Борисов Б.А., Надежкин С.М. Оптимизация содержания лабильного органического вещества в почвах лесостепи Поволжья.

5. Карелин Д.В., Замолотчиков Д.Г., Зукерт Н.В. [и др.] Межгодовые изменения ФАР и влажности почвы в теплый сезон могут быть важнее для направления годового углеродного баланса в тундрах, чем колебания температуры // *Журнал общей биологии*. – 2013. – Т. 74. – № 1. – С. 3–22. – EDN PURUKR.

6. Когут Б.М. Оценка содержания гумуса в пахотных почвах России // *Почвоведение*. - 2012. - № 9. - С. 944–952.

7. Коломыц Э.Г. Избранные очерки географической экологии: часть II: ландшафтно-экологические прогнозы. – С. 5–146. /Тольяти 2015– DOI 10.24411/2073–1035-2018-10025.

8. Akinsete, Shade & Nortcliff, Stephen. (2014). Storage of Total and Labile Soil Carbon Fractions Under Different Land-Use Types: A Laboratory Incubation Study. *Soil Carbon*. 10.1007/978-3-319-04084-4_21.

9. Кирюшин В.И., Ганжара Н.Ф., Кауричев И.С., Орлов Д.С., Титлянова А.А., Фокин А.Д. Концепция оптимизации режима органического вещества почв в агроландшафтах. М.: Изд-во МСХА, 1993. 99 с.

10. Fine, A. 2. (2017). Fine, Aubrey & van Es, Harold & Schindelbeck, Robert. (2017). Statistics, Scoring Functions, and Regional Analysis of a Comprehensive Soil Health Database. *Soil Science Society of America Journal*. 81. 10.2136/sssaj2016.09.0286.

11. Борисов Б.А., Ганжара Н.Ф., Таразанова Т.В. Диагностика степени выпаханности почв различных зон по содержанию легкоразлагаемых органических веществ // *Изв. ТСХА*. 2004. - № 1. - С. 16-23.

12. Gal A, Vyn TJ, Micheli E, Klavivko EJ, McFee WW (2007) Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing overestimated with tilled-zone sampling depths. *Soil Tillage Res* 96:42–51

13. Culman, Steve, M. Freeman, and S. Snapp. 2012. Procedure for determination of permanganate oxidizable carbon. Kellogg Biological Station, Michigan State University, Hickory Corners, MI 49060. Found at <http://lter.kbs.msu.edu/protocols/133>.

Цитирование:

Прохоров А.А. Характеристика методов выделения фракций почвенного органического вещества и их использование для оценки гумусового состояния почв [Электрон. ресурс] // *АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал*. – 2022. – № 6. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/6/st_604.pdf. DOI: <https://doi.org/10.51419/202126604>.