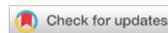


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-114-5-28



Ссылки для цитирования:

Когут Б.М., Милановский Е.Ю., Хаматнуров Ш.А. О методах определения содержания органического углерода в почвах (критический обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 114. С. 5-28. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-114-5-28

Cite this article as:

Kogut B.M., Milanovsky E.Yu., Hamatnurov Sh.A., Methods for determining the organic carbon content in soils (critical review), Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 114, pp. 5-28, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-114-5-28

Благодарность:

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6).

Acknowledgments:

The work has been carried out within the framework of the most important innovative state project “Development of the system of ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes on the territory of the Russian Federation, providing for the creation of a system of accounting data on the fluxes of climatically active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (registration No. 123030300031-6).

О методах определения содержания органического углерода в почвах (критический обзор)

© 2023 г. Б. М. Когут^{1*}, Е. Ю. Милановский²,
Ш. А. Хаматнуров¹

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

*e-mail: kogutb@mail.ru.

²*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения
РАН, Россия,*

142290, Московская обл., Пушкино, ул. Институтская, 2, корп. 2.

Поступила в редакцию 23.12.2022, принята к публикации 22.03.2023

Резюме: Изложены теоретические основы методов определения содержания почвенного органического углерода (ПОУ) прямым способом сухого сжигания на автоматических анализаторах и косвенным – по окисляемости Тюрина и Уолкли–Блэка. Приведены авторские и литературные экспериментальные данные анализов C_{org} в различных почвах с помощью этих методов. Сравнительный анализ приведенных данных показал, что в одних случаях содержание ПОУ, определенное по окисляемости, ниже, чем таковое, полученное способом сухого сжигания (в большинстве), а в других – наоборот, выше. Этот вывод находится в полном соответствии с теоретическими взглядами Тюрина о химической природе почвенного органического вещества (ПОВ). Дано схематическое описание определения содержания общего (органического) углерода в некарбонатных почвах способом сухого сжигания на автоматических анализаторах Лесо (США) и АН-7529 (Гомель, Беларусь). Указано на сложности определения содержания ПОУ способом сухого сжигания на автоматических анализаторах в карбонатных почвах. Рекомендовано определять содержание неорганического углерода с помощью разложения карбонатов раствором $HClO_4$ на экспресс-анализаторе АН-7529 в этих почвах. Прямой метод определения содержания ПОУ обладает наилучшей метрологической характеристикой по сравнению с таковой косвенного, что убедительно подтверждает авторитетные мнения Шолленберга и Тюрина о приблизительности последнего. Сделан вывод, что показатели, определяемые по методам Тюрина и Уолкли–Блэка и сухого сжигания, являются химически независимыми, характеризующими соответственно окисляемость и содержание органического углерода ПОВ. Рекомендовано при мониторинге содержания и запасов органического углерода в почвах использовать метод сухого сжигания на автоматических анализаторах.

Ключевые слова: почвенное органическое вещество, почвенный органический углерод, методы Тюрина и Уолкли–Блэка, метод сухого сжигания на автоматических анализаторах.

Methods for determining the organic carbon content in soils (critical review)

© 2023 B. M. Kogut¹, E. Yu. Milanovsky², Sh. A. Hamatnurov¹

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Puzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
e-mail: kogutb@mail.ru.

²*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science,
Russian Academy of Sciences, Russia,
2 Bld. 2 Institutskaya Str., Pushchino 142290, Moscow region,
Russian Federation.*

Received 23.12.2022, Accepted 22.03.2023

Abstract: The paper presents theoretical basis of the methods for determining the content of soil organic carbon (SOC) both by direct dry combustion using automated analyzers and indirectly – by I.V. Tyurin and Walkley–Black oxidation. Author’s and literature experimental data of SOC analyses in various soils by these methods are presented. Comparative analysis of the above data showed that in some cases the content of SOC determined by oxidability is lower than the one obtained by dry combustion (in most cases), while in others, on the contrary, the content of SOC is higher. This conclusion fully complies with the theoretical views of I.V. Tyurin on the chemical nature of soil organic matter (SOM). A schematic description of determining the content of total (organic) carbon in non-carbonate soils by dry combustion method using automated analyzers Leco (USA) and AH-7529 (Gomel, Belarus) is given. It was pointed out that it is difficult to determine SOC content by dry combustion method with automated analyzers in carbonate soils. For these soils it is recommended to determine the content of inorganic carbon by decomposition of carbonates with HClO₄ solution using express analyzer AN-7529. The direct method of determining the content of SOC has the best metrological characteristics compared to ones of the indirect method, which convincingly confirms the authoritative opinions of Schollenberg and Tyurin about the inaccuracy of the latter. It is concluded that the indicators determined by the methods of Tyurin and Walkley–Black and dry combustion are chemically independent, characterizing, respectively, the oxidability and organic carbon content of SOM. It is recommended to use dry combustion method with automated analyzers when monitoring the content and stocks of organic carbon in soils.

Keywords: soil organic matter, soil organic carbon, Tyurin and Walkley–Black methods, method of dry combustion with automated analyzers.

ВВЕДЕНИЕ

Современная проблема глобального изменения климата и связанные с ней исследования циклов углерода в окружающей среде, процессов дегумусирования и почвенной секвестрации углерода, зависящих от количественной оценки пространственно-временных изменений запасов почвенного органического углерода (ПОУ) на глобальном и региональном уровне, привела к актуализации изучения методов анализа почв на содержание $C_{орг}$.

В фундаментальных монографиях И.В. Тюрина (1937) и С.А. Ваксмана (1937) дан глубокий и всесторонний анализ методов определения содержания органического углерода в минеральных, в т. ч. карбонатных, и торфяных почвах. Ими детально рассмотрены теоретические основы и экспериментальные приемы выполнения анализов, представлена информация об истории возникновения и развития методов определения как содержания ПОУ, так и почвенного органического вещества (ПОВ) в целом.

В данной статье авторы ограничатся только обсуждением вопросов, связанных с аналитическими методами определения содержания ПОУ. На X Международном конгрессе почвоведов (Москва, 1974 г.) М.М. Кононова предложила отказаться от использования показателя “содержание гумуса”, перейдя к более простому и точнее определяемому – “содержание органического углерода” (Когут, Фрид, 1993). В современной научной литературе по ПОВ последний показатель приобрел доминирующее значение.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ

При определении содержания ПОУ используют прямые и косвенные методы анализа (Теория и практика..., 2006). К прямым методам относятся способы сухого и мокрого сжигания с последующей фиксацией количества выделившегося диоксида углерода. Наиболее известные в нашей стране – способ сухого сжигания по Густавсону (Тюрин, 1934) и мокрого озоления по Кнопу (Knop, 1872).

Согласно С.А. Ваксману (Ваксман, 1937, с. 394) “сухое сжи-

гание основано на принципе элементарного анализа Либиха; почва прокаливается в печи для сжигания в струе кислорода в присутствии сильно окисленной окиси меди. Углекислый газ поглощается либо во взвешенных натронных трубках, либо титрованными растворами щелочей“.

Применение косвенных методов определения содержания ПОУ по Тюрину и Уолкли–Блэку основано на допущении, предложенном В.И. Ищерековым (1904) и детально разработанном И.В. Тюриным (1931; 1937). Согласно этому предложению значения содержания $C_{\text{орг}}$, определенные прямым методом сухого сжигания и мокрого озоления, и таковые, полученные косвенным методом по окисляемости, будут совпадать, если степень окисленности органического вещества равна 0.

В экспериментальной работе (Пономарева, Плотникова, 1967) было показано, что при сопоставлении данных, полученных прямым методом мокрого озоления по Кнопу и косвенным методом Тюрина по окисляемости, нулевая степень окисленности ПОВ – скорее исключение, чем правило. Из проанализированных 100 образцов из различных почв России, Эстонии, Франции и Бирмы только в 6 степень окисленности была равна 0.

Анализ данных таблицы 1 показал, что в одних случаях содержание ПОУ, определенное по окисляемости, ниже, чем такое, полученное способом сухого сжигания (в большинстве), а в других – наоборот, выше.

Приведенные экспериментальные результаты исследований различных авторов полностью соответствуют теоретическим положениям, ранее высказанным И.В. Тюриным (1936): “Причины отклонений в ту и другую сторону лежат в различной степени внутримолекулярной окисленности гумуса, состав которого может выражаться в одних случаях формулой $C_nH_{2m}O_m$, в других – $C_nH_{2m}O_{m-x}$, в третьих, наоборот, – $C_nH_{2m}O_{m+y}$. Поэтому полное совпадение результатов приблизительных методов (принимая во внимание неполноту окисления) может быть только в первом случае; во втором случае титрометрическое определение должно дать более высокие результаты, так как часть хромовой кислоты израсходуется на окисление водорода, а в третьих случаях,

Таблица 1. Результаты определения содержания органического углерода способом сухого сжигания на автоматических анализаторах, методами Тюрина и Уолкли–Блэка по окисляемости, степени внутримолекулярной окисленности ПОВ, а также неорганического углерода для различных почв

Table 1. Results of determining of organic carbon content for different soils: by dry combustion method using automated analyzers; by Tyurin and Walkley–Black methods based on oxidability, degree of intramolecular oxidation of SOC, and inorganic carbon

Почва, образец	Мокрое озоление, по окисляемости, C _{орг}		Сухое сжигание на анализаторах		Степень окисленности		Источник
	C _{1орг}	C _{2орг}	C _{неорг}	C _{3орг}	1ω	2ω	
Дерново-подзолистая СП-2	0.42		нет	0.57	26.3		“Аналитическое обеспечение..., 1993” Когут, Фрид, 1993
Дерново-подзолистая супесчаная СДПС-3	0.71		нет	0.89	20.2		
Чернозем СП-1	3.23		нет	3.67	12.0		
Краснозем СКР-3	2.39		нет	3.19	25.1		
Чернозем выщелоченный САЧВП-01	1.80		нет	2.22	18.9		
Чернозем карбонатный САЧкП-01	2.26		0.09	2.92	22.6		

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Почва, образец		Мокрое озоление, по окисляемости, C _{орг}		Сухое сжигание на анализаторах		Степень окисленности		Источник
		C _{1орг}	C _{2орг}	C _{неорг}	C _{3орг}	1 ω	2 ω	
Светло-каштановая СП-3		1.06		0.34	1.33	20.3		Аналитическое обеспечение..., 1993 Когут, Фрид, 1993
Засоленная САЗП-01		0.91		1.27	1.22	25.4		
Солонцовая САСолП-01		0.93		нет	1.23	24.4		
Серозем карбонатный ССК-3		0.27		2.32	0.42	35.7		
Феррасоль, см	0–10	7.64		нет	22.9	22.9		Милановский, 2009
	20–30	3.23		нет	28.5	28.5		
	60–80	1.18		нет	38.9	38.9		
Soil FS		1.48		нет	2.10	29.5		Ciavatta et al., 1989
Soil A		1.57		нет	2.25	30.2		
Eutric Albeluvisol 92 образца, 0–20 см		2.05	2.14	нет	1.94	-5.7	-10.3	Jankauskas et al., 2006

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Почва, образец	Мокрое озоление, по окисляемости, C _{орг}		Сухое сжигание на анализаторах		Степень окисленности		Источник
	C _{1орг}	C _{2орг}	C _{неорг}	C _{3орг}	1ω	2ω	
Brazilian savannah soils 54 образца, 0–20см		1.64	нет	2.29		28.4	Sato et al., 2014
Дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, САДПП-09/4, ОСО 18911	0.79	0.77	нет	0.98	19.4	21.4	Shamrikova et al., 2022
Дерново-подзолистая среднесуглинистая GSO 10413-2014	1.07	1.02	нет	1.32	18.9	22.7	
Дерново-подзолистая супесчаная почва, ОСО 10904	1.66	1.52	нет	1.9	12.6	20.0	
Серая лесная супесчаная, ОСО 11201	2.13	2.09	нет	2.68	20.5	22.0	
Чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый, ОСО 21401	3.37	3.23	нет	4.01	16.0	19.5	
Чернозем карбонатный среднесуглинистый ОСО 39002	3.33	3.16	??	3.93	15.3	19.6	

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Почва, образец	Мокрое озоление, по окисляемости, C _{орг}		Сухое сжигание на анализаторах		Степень окисленности		Источник
	C _{1орг}	C _{2орг}	C _{неорг}	C _{3орг}	1ω	2ω	
Чернозем типичный легкосуглинистый OSO 29106	4.15	3.94	нет	4.93	15.8	20.1	Shamrikova et al., 2022
Pamplona, ES		1.20	2.83	1.60		25.0	Apestequia et al., 2018
Typic Haploxerept		1.23	2.83	1.56		21.2	
Typic Haploxerept		0.77	4.30	0.72		-6.9	
Fluventic Haploxerept		0.91	4.76	0.84		-8.3	
Fluventic Haploxerept		1.07	4.62	1.11		3.6	
Typic Calcixerept		0.84	0.81	0.91		7.7	
Typic Calcixerept		2.78	0.91	2.96		6.1	
Petrocalcic Calcixerept		1.47	1.98	1.62		9.3	
Typic Calcixerept		0.75	3.79	0.99		24.2	

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Почва, образец	Мокрое озоление, по окисляемости, C _{орг}		Сухое сжигание на анализаторах		Степень окисленности		Источник
	C _{1орг}	C _{2орг}	C _{неорг}	C _{3орг}	1ω	2ω	
Typic Calcixerept		0.94	3.75	1.26		25.4	Apestegui et al., 2018
Typic Calcixerept		0.72	4.68	0.88		18.2	
Calcic Haploxerept		1.01	4.11	0.96		-5.2	
Calcic Haploxerept		1.49	3.98	1.67		10.8	
Typic Xerorthent		0.70	4.00	0.84		16.7	
Typic Xerorthent		1.36	3.49	1.44		5.6	
Petrocalcic Rhodoxeralf		3.02	-0.09	3.85		21.6	
Xeric Haplocalcid		0.79	3.72	0.88		10.2	
Xeric Haplocalcid		0.75	3.57	0.86		12.8	
Xeric Haplocalcid		1.33	2.93	1.41		5.7	

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Почва, образец	Мокрое озоление, по окисляемости, $C_{орг}$		Сухое сжигание на анализаторах		Степень окисленности		Источник
	$C_{1орг}$	$C_{2орг}$	$C_{неорг}$	$C_{3орг}$	1 ω	2 ω	
Xeric Haplocalcid		1.41	2.88	1.46		3.4	Apestequia et al., 2018

Примечание. В некарбонатных почвах способом сухого сжигания определяли $C_{общ} = C_{орг}$, а в карбонатных почвах способом сухого сжигания определяли $C_{общ}$, а $C_{орг} = C_{общ} - C_{неорг}$.

$C_{3орг}$, $C_{1орг}$, $C_{2орг}$ – содержание органического углерода, определенное методами сухого сжигания и по окисляемости Тюрина и Уолкли–Блэка соответственно; 1 ω , 2 ω – степень внутримолекулярной окисленности органического вещества почвы, рассчитанная по данным $C_{3орг}$, $C_{1орг}$ и $C_{2орг}$ по формуле (Пономарева, Плотнокова, 1967): 1 $\omega = (C_{3орг} - C_{1орг}/C_{3орг}) \times 100\%$; 2 $\omega = (C_{3орг} - C_{2орг}/C_{3орг}) \times 100\%$.

Note. In non-carbonate soils C_{total} was determined by dry combustion method $C_{total} = C_{орг}$, and in carbonate soils C_{total} was determined by dry combustion, but $C_{орг} = C_{total} - C_{inorg}$.

$C_{3орг}$, $C_{1орг}$, $C_{2орг}$ – are organic carbon contents determined by dry combustion and by Tyurin and Walkley–Black oxidation, respectively; 1 ω , 2 ω are intramolecular oxidation degree of soil organic matter, calculated from $C_{3орг}$, $C_{1орг}$, $C_{2орг}$ data by the formula (Ponomareva, Plotnikova, 1967):

$$1\omega = (C_{3орг} - C_{1орг}/C_{3орг}) \times 100\%; 2\omega = (C_{3орг} - C_{2орг}/C_{3орг}) \times 100\%.$$

наоборот, титрометрическое определение даст более низкие результаты, чем метод сухого сжигания, так как часть углерода в гумусе уже является окисленной за счет избытка кислорода O_2 ”.

Следует отметить, что помимо степени окисленности ПОВ на надежность определения содержания $C_{орг}$ по методам Тюрина и Уолкли–Блэка могут оказывать влияние и такие факторы, как температура и время мокрого озоления, наличие в почве хлоридов и закисных соединений железа и др. ([Ваксман, 1937](#); [Никитин, 1999](#); [Орлов и др., 1996](#); [Титова, Когут, 1991](#); [Тюрин, 1937](#)). В начале прошлого века разработка альтернативы методам Кнопа–Сабанина и Густавсона и широкое распространение “приблизительного” ([Schollenberger, 1927](#)) метода определения $C_{орг}$ по окисляемости было вызвано необходимостью обработки “огромного количества собираемых при полевых исследованиях материалов, в целях общей и агрономической характеристики почв” ([Тюрин, 1931](#)).

Развитие аналитического приборостроения во второй половине XX века привело к разработке автоматических анализаторов определения содержания $C_{орг}$, базирующихся на принципе сухого сжигания, не уступающих и даже превосходящих по производительности косвенные методы анализа по Тюрину и Уолкли–Блэку. Так, в 1970 г. Табатабаи и Бремнер ([Tabatabai, Bremner, 1970](#)) предложили использовать автоматический анализатор Leco, сконструированный для определения содержания углерода в сталях и сплавах, для анализа почв на общее содержание углерода. Производительность метода составила до 150 анализов в день. Однако, зарубежные анализаторы (Leco, Shimadzu, Perkin-Elmer и др.) характеризовались высокой стоимостью, что существенно ограничивало возможности их широкого внедрения в почвенные и агрохимические исследования.

В начале 80-х годов прошлого века в Почвенном институте им. В.В. Докучаева был испытан экспресс-анализатор АН-7529 (Гомель), также изначально предназначенный для определения углерода в сталях и сплавах, с целью установления содержания общего углерода в почвах ([Кочетов и др., 1985](#)). В дальнейшем была разработана и аттестована методика определения содержа-

ния общего, органического и неорганического углерода в почвах на базе этого автоматического анализатора с использованием государственных стандартных образцов почвенных масс ([Аналитическое обеспечение..., 1993](#)). Стоимость анализатора АН-7529 была в 5–10 раз меньше стоимости зарубежных аналогов, а цена одного анализа на нем – не менее чем в 10 раз ниже, по сравнению с зарубежными приборами.

Здесь следует еще раз отметить, что при использовании вышеуказанными авторами режима сжигания почвенных проб (температура выше 1 000 °С) определяется общее содержание углерода. В случае некарбонатных почв и почв, не получающих карбонаты с мелиорантами и удобрениями, этот параметр будет равен содержанию органического углерода. При определении количества органического углерода в карбонатных почвах необходимо осуществление специальных приемов, позволяющих учесть содержание углерода карбонатов.

В Новой Зеландии ([Blakemore et al., 1977](#)) был применен разностный метод определения неорганического углерода в карбонатных почвах на базе автоматического анализатора Leco. В одной навеске почвы при температуре выше 1 000 °С определяют общий углерод. Другую навеску почвы обрабатывают соляной кислотой для освобождения от карбонатов. Образец высушивают при температуре 100 °С в течение 30 мин для удаления паров соляной кислоты, а затем определяют содержание органического углерода методом сухого сжигания на автоматическом анализаторе Leco. По разности величин находят содержание неорганического углерода. Критически оценивая этот способ, который часто рекомендуют использовать и в современных приборах, отметим: во-первых, снижение надежности определения содержания $C_{орг}$ за счет изменения массы навески при обработке ее кислотой; во-вторых, резкое падение производительности анализатора.

В ВИУА ([Срапенянци и др., 1979](#)) и в Почвенном институте им. В.В. Докучаева ([Рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный метод..., 1982](#)) для разработки методики экспрессного определения содержания общего углерода и углерода органической части некарбонатных почв был использован автоматический анализатор DC-12 фирмы Leco (США). Как показали исследования,

при определении углерода в органической части карбонатных почв возникают затруднения, связанные с выбором температуры. Была предложена температура 650–700 °С, однако в этом случае не происходит, по-видимому, полного окисления органического вещества почвы. Кроме того, при значительном содержании карбонатов они могут даже при сравнительно низких температурах сжигания почвенного образца вносить заметный вклад в количество определяемого углерода. Существенно искажают результаты анализа и присутствующие в почве карбонаты магния и другие неорганические соединения, способные образовывать CO₂ в том же интервале температур, что и органическое вещество почвы.

В Почвенном институте им В.В. Докучаева на базе автоматического анализатора АН-7529 была предложена методика определения содержания общего, органического и неорганического углерода в карбонатных почвах ([Аналитическое обеспечение..., 1993](#)). В одной навеске почвы при ее сжигании (температура выше 1 000 °С) определяют общий углерод. Другую навеску почвы помещают в специально сконструированную приставку к прибору и обрабатывают раствором HClO₄. Выделяющийся CO₂ карбонатов почв напрямую, минуя печь, поступает в поглотительный раствор, и его определяют с помощью метода кулонометрического титрования. По разности между количеством общего и неорганического углерода вычисляют органический углерод почвы. Производительность раздельного определения содержания неорганического и органического углерода в карбонатных почвах на анализаторе АН-7529 составила до 50 образцов в рабочую смену.

Особо следует остановиться на сравнительной оценке метрологических характеристик определений содержания углерода прямым способом сухого сжигания на автоматических анализаторах и косвенным методом по окисляемости Тюрина. Необходимо дать некоторые пояснения применяемым метрологическим характеристикам. Воспроизводимость и правильность являются основными показателями качества аналитической информации. Воспроизводимость относится к флуктуациям серии измерений случайной величины относительно центра распределения серии, правильность – к расхождению между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины. Проблема правильно-

сти информации связана с другими проблемами, как, например, состоятельность информации: способности аналитических процедур адекватно отражать действительность. Надежным способом выявления и обеспечения правильности является создание стандартных образцов, аттестованных в межлабораторном эксперименте по составу и свойствам, и широкое использование их в аналитической практике в качестве калибровочных и контрольных ([Большаков, 1992](#); [Большаков и др., 1995](#); [Метрологическое обеспечение..., 1988](#)).

По авторитетному мнению Д.С. Орлова с соавторами ([1996](#)): *“Все предложенные модификации метода Тюрина дают хорошую воспроизводимость результатов, ... но не обеспечивают достаточную (примечание авторов) **правильность** результатов”*. Это заключение следует из анализа данных таблицы 2. Более того, правильность метода сухого сжигания даже в межлабораторном эксперименте превосходит таковую метода Тюрина во внутрилабораторном (табл. 2 и 3).

Вывод Д.С. Орлова с соавторами ([1996](#)) о правильности метода Тюрина хорошо согласуется с таковым Nilson, Sommers ([1996](#)), которые считают, что метод Уолкли–Блэка является приблизительным или полуколичественным для оценки содержания $C_{орг}$.

В последнее время в международных и отечественных проектах поставлена цель уточнения оценок запасов органического углерода в почвах ([Чернова, Голозубов, 2018](#); [Soil Organic carbon mapping..., 2017](#)). В связи с вышеизложенным совершенно не ясна цель работ Глобальной сети почвенных лабораторий Glosolan, а в нашей стране – коллектива Института биологии Коми НЦ УрО РАН как Национальной референтной лаборатории Российской Федерации ([Шамрикова и др., 2022](#); [Shamrikova et al., 2022](#)) по созданию новой модификации метода Тюрина.

Справедливости ради стоит отметить, что эта модификация несколько улучшает метрологические характеристики определения окисляемости ПОВ, но это не имеет никакого отношения к повышению точности определения содержания ПОУ.

Таблица 2. Результаты определения содержания C_{org} методом Тюринга в различных модификациях во внутрилабораторном эксперименте (Орлов и др., 1996)
Table 2. Results of determination of C_{org} content by Tyurin's method in different modifications in intralaboratory experiment (Orlov et al., 1996)

Метод	Чернозем выщелоченный, гор. А ₁		Дерново- подзолистая почва, гор. А ₁	
	n	M ± tm	n	M ± tm
Сухое сжигание (анализатор АН-7529)	4	5.43 ± 0.01	4	2.36 ± 0.00
Метод Тюринга без катализатора	4	4.17 ± 0.30	4	1.75 ± 0.06
Метод Тюринга с катализатором	4	4.93 ± 0.10	4	2.14 ± 0.06
Метод Тюринга в модификации Никитина, 20 мин, 150 °С	4	3.78 ± 0.03	4	1.63 ± 0.01
Метод Тюринга в модификации Никитина, 30 мин, 160 °С	4	4.23 ± 0.08	4	1.86 ± 0.03
Метод Тюринга в модификации Никитина с катализатором, 30 мин, 160 °С	4	4.69 ± 0.02	4	1.99 ± 0.05
Метод Тюринга в модификации Антоновой, Скалабана, Сучилкиной	4	3.71 ± 0.15	4	1.55 ± 0.02

Таблица 3. Результаты аттестации стандартных образцов СП1 и СП2 на содержание органического углерода способом сухого сжигания в различных организациях ([Аналитическое обеспечение..., 1993](#))

Table 3. Results of certification of standard samples СП1 and СП2 in terms of C_{org} content by dry combustion method in different organizations ([Analytical support..., 1993](#))

Тип анализатора	Организация	Статистические параметры			
		M	S	m	S
<i>СП-1 Курский чернозем</i>					
АН-7529	Почвенный институт им. В.В. Докучаева	3.54	0.05	0.02	1.3
	Геологический факультет МГУ	3.69	0.05	0.02	1.3
	ИГЕМ*	3.59	0.03	0.01	0.9
ВИУА-Хереус	ПИСХ** Каунас	3.72	0.04	0.02	1.1
	ПИСХ** Харьков	3.99	0.06	0.03	1.6
	ПИСХ** Саратов	3.80	0.04	0.02	1.1
	ВИУА***	3.64	0.05	0.02	1.5
Леко	Почвенный институт им. В.В. Докучаева	3.47	0.10	0.04	2.9
	ВИУА***	3.53	0.02	0.01	0.6
<i>СП-2 Московская дерново-подзолистая почва</i>					
АН-7529	Почвенный институт им. В.В. Докучаева	0.49	0.01	0.003	1.5
	Геологический факультет МГУ	0.60	0.01	0.004	1.8
	ИГЕМ*	0.59	0.01	0.01	2.4
ВИУА-Хереус	ПИСХ** Каунас	0.55	0.02	0.01	3.3
	ПИСХ** Харьков	0.61	0.01	0.01	2.1
	ПИСХ** Саратов	0.71	0.02	0.01	3.0
	ВИУА***	0.45	0.05	0.02	11.4
Леко	Почвенный институт им. В.В. Докучаева	0.63	0.03	0.01	5.4
	ВИУА***	0.39	0.02	0.01	5.6

Примечание. *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, **Проектно-изыскательская станция химизации, ***Всероссийский институт удобрений и агрохимии им. Д.Н. Прянишникова.

Хорошо известно, что ранее было предложено множество модификаций метода Тюрина, но ни одна из них не получила доминирующего распространения как в почвенных исследованиях СССР, стран Восточной Европы, так и в таковых в современной России.

Предлагаемая указанными выше авторами цель обобщения накопленных данных по содержанию ПОУ, определяемых по окисляемости методами Тюрина и Уолкли–Блэка, в почвах России и Мира в современных условиях устарела и не приведет к повышению точности оценок запасов ПОУ на глобальном и региональном уровне. Следует также отметить, что сделанные ранее оценки запасов ПОУ, основанные на базах данных по содержанию ПОУ, определенного по методу Тюрина, в почвах России сильно отличались у разных авторов. Одной из причин этого, по мнению (Когут и др., 2021), является результат анализа данных, полученных различными вариантами метода Тюрина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, обоснованность преимущества прямого метода сухого сжигания на автоматических анализаторах, по сравнению с косвенным методом Тюрина по окисляемости, для определения содержания ПОУ, как с теоретических, так и с метрологических позиций не вызывает сомнений. Рекомендовано при мониторинге содержания и запасов органического углерода в почвах использовать метод сухого сжигания на автоматических анализаторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитическое обеспечение мониторинга гумусового состояния почв: Методические указания / Б.М. Когут (сост.). М.: РАСХН, 1993. 74 с.
2. *Большаков В.А.* Надежность анализа почв: проблемы и решения. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1992. 144 с.
3. *Большаков В.А., Когут Б.М., Фрид А.С.* Переаттестация государственных стандартных образцов почвенных масс // Почвоведение. 1995. № 3. С. 308–313.
4. *Ваксман С.А.* Гумус. Происхождение, химический состав и значение его в природе. М.: Огиз-Сельхозгиз, 1937. 471 с.

5. *Ищереков В.И.* Определение гумуса в почве титрованием хамелеоном // Журнал опытной агрономии. 1904. Т. 5. С. 55.
6. *Козут Б.М., Фрид А.С.* Сравнительная оценка методов определения содержания гумуса в почвах // Почвоведение. 1993. № 9. С. 119–123.
7. *Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н.* Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. 2021. № 5. С. 3–13.
8. *Кочетов А.И., Шевченко А.В., Астапенко Е.В., Марченко Т.И.* Определение углерода в почвах на базе экспресс-анализатора АН-7529 // Тез. докл. VII делегат. съезда ВОП. Ташкент, 1985. Ч. 2. С. 122.
9. Метрологическое обеспечение аналитических работ в почвоведении. Методические рекомендации / Сост. *В.А. Большаков, А.С. Фрид, С.Е. Сорокин*. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1988. 112 с.
10. *Милановский Е.Ю.* Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. Москва: ГЕОС, 2009. 188 с.
11. *Никитин Б.А.* Метод определения гумуса почвы // Агрохимия. 1999. № 5. С. 91.
12. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.
13. *Пономарева В.В., Плотникова Т.А.* Некоторые данные о степени внутримолекулярной окисленности гумуса разных типов почв (к вопросу о переводном коэффициенте с углерода на гумус) // Почвоведение. 1967. № 7. С. 85–95.
14. Рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный метод анализа почв в целях контроля качества их загрязненности / Состав. *Большаков В.А., Сорокин С.Е., Свищев Л.Е.* М.: Почв. ин-т им.В.В.Докучаева, 1982. 48 с.
15. *Срапеняц С.А., Бродский Е.С., Клягин К.Н., Шевцова Л.К.* Экспрессное определение углерода в почвах методом сжигания // Агрохимия. 1979. № 7. С. 132–137.
16. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. *Л.А. Воробьевой*). М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
17. *Титова Н.А., Козут Б.М.* Трансформация органического вещества при сельскохозяйственном использовании почв // Итоги науки и техники (серия почвоведение и агрохимия). Т. 8. М.: Изд-во ВИНТИ, 1991. 156 с.
18. *Тюрин И.В.* Новое видоизменение объемного метода определения гумуса с помощью хромовой кислоты // Почвоведение. 1931. № 5–6. С. 36–47.
19. *Тюрин И.В.* К вопросу о методике изучения органического вещества почвы в биохимическом отношении // Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 1934. № 10(4). С. 27–37.

20. *Тюрин И.В.* Материалы по сравнительному изучению методов определения органического углерода в почвах. Методы определения общего органического углерода и уголекислоты карбонатов // Проблемы современного почвоведения. 1936. №. 2. С. 121.
21. *Тюрин И.В.* Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии. Учение о почвенном гумусе. М.-Л.: Сельхозгиз, 1937. 287 с.
22. *Чернова О.В., Голозубов О.М.* Всемирная карта запасов органического углерода в 30 см слое почвы для территории России (проект ФАО ООН GSOC17) // Современное состояние черноземов. Мат-лы II Международ. научн. конф. 2018. Т. 1. С. 49–56.
23. *Шамрикова Е.В., Ванчикова Е.В., Кондратёнок Б.М., Лантева Е.М., Кострова С.Н.* Проблемы и ограничения дихроматометрического метода измерения содержания почвенного органического вещества (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 787–794.
24. *Apesteguía M., Plante A. F., Virtoc I.* Methods assessment for organic and inorganic carbon quantification in calcareous soils of the Mediterranean region // *Geoderma Regional*. 2018. Vol. 12. P. 39–48.
25. *Blakemore L.C., Searle P.L., Daly B.K.* Methods for chemical analysis of soils // New Zealand Soil Bureau. Scientific Report 10. Dep. of Sci. and Industrial Res. New Zealand, 1977. 112 p.
26. *Ciavatta C., Vittori L. Antisari, P. Sequi.* Determination of organic carbon in soils and fertilizers // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1989. Vol. 20. Iss. 7–8, P. 759–773.
27. *Jankauskas B., Jankauskiene G., Slepeliene A., Booth C.* International Comparison of Analytical Methods of Determining the Soil Organic Matter Content of Lithuanian Eutric Albeluvisols // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2006. Vol. 37. P. 707–720.
28. *Knop W.* Ueber die Bedeutung des Humus // *Landw. Vers. Sta.* 1872. Vol. 15. P. 13–21.
29. *Nelson D.W., Sommers L.E.* Total carbon, organic carbon, and organic matter // Sparks D.L. et al. (Eds). *Methods of Soil Analysis. Part 3.* Madison: SSSA Book Series, 1996. P. 961–1010.
30. *Sato J.H., Figueiredo C.C., Marchão R.L., Madari B.E., Benedito L.E.C., Busato J.G., Souza D.M.* Methods of soil organic carbon determination in Brazilian savannah soils // *Sci. Agric.* 2014. Vol. 71. No. 4. P. 302–308.
31. Soil Organic carbon mapping. GSOC Map. cookbook manual / Eds. *Y. Yugini, R. Baritz, R.R. Vargas.* Rome, 2017.
32. *Shamrikova E.V., Kondratenok B.M., Tumanova E.A., Vanchikova E.V., Lapteva E.M., Zonova T.V., Lu-Lyan-Min E.I., Davydova A.P., Libohova Z.,*

- Suvannang N.* Transferability between soil organic matter measurement methods for database harmonization // *Geoderma*. 2022. Vol. 412. 115547.
33. *Schollenberger C.J.* A rapid approximate method for determining soil organic matter // *Soil Science*. 1927. No. 1. XXIV.
34. *Tabatabai M.A., Bremner J.M.* Use of the Leco automatic 70-second carbon analyzer for total carbon analyses of soils // *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 1970. Vol. 34. No. 4. P. 608–610.

REFERENCES

1. Kogut B.M. (Compiler), *Analiticheskoe obespechenie monitoringa gumusovogo sostoyaniya pochv* (Analytical support for monitoring of humus condition of soils), Moscow: RASKhN, 1993, 74 p.
2. Bol'shakov V.A., *Nadezhnost' analiza pochv: problemy i resheniya* (Reliability of soil analysis: Problems and Solutions), Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 1992, 144 p.
3. Bol'shakov V.A., Kogut B.M., Frid A.S., *Pereattestatsiya gosudarstvennykh standartnykh obraztsov pochvennykh mass* (Re-certification of state standard samples of soils), *Pochvovedenie*, 1995, No. 3, pp. 308–313.
4. Vaksman S.A., *Gumus. Proiskhozhdenie, khimicheskii sostav i znachenie ego v prirode* (Humus. Origin, chemical composition and its significance in nature.), Moscow: Ogiz-Sel'khozgiz, 1937, 471 p.
5. Ishcherekov V.I., *Opredelenie gumusa v pochve titrovaniem khameleonom* (Determination of humus in the soil by titration chameleon), *Zhurnal opytnoi agronomii*, 1904, Vol. .5, pp. 55.
6. Kogut B.M., Frid A.S., *Sravnitel'naya otsenka metodov opredeleniya sodержaniya gumusa v pochvakh* (Comparative evaluation of methods of determination of humus content in soils), *Pochvovedenie*, 1993, No. 9, pp. 119–123.
7. Kogut B.M., Semenov V.M., Artem'eva Z.S., Danchenko N.N., *Degumusirovanie i pochvennaya sekvestratsiya ugleroda* (Dehumification and soil carbon sequestration), *Agrokimiya*, 2021, No. 5, pp. 3–13.
8. Kochetov A.I., Shevchenko A.V., Astapenko E.V., Marchenko T.I., *Opredelenie ugleroda v pochvakh na baze ekspress-analizatora AN-7529* (Determination of carbon in the soil based on express analyzer AN-7529), *Proc. of the VII delegate congress of VOP*, Tashkent, 1985, Part 2, p. 122.
9. Bol'shakov V.A., Frid A.S., Sorokin S.E. (Compilers), *Metrologicheskoe obespechenie analiticheskikh rabot v pochvovedenii. Metodicheskie rekomendatsii* (Metrological Support of Analytical Works in Soil Science. Methodical recommendations), Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 1988, 112 p.

10. Milanovskiy E.Yu., *Gumusovye veshchestva pochv kak prirodnye gidrofobno-gidrofil'nye soedineniya* (Humus substances of soils as natural hydrophobic-hydrophilic compounds), Moscow: GEOS, 2009, 188 p.
11. Nikitin B.A., *Metod opredeleniya gumusa pochvy* (Method of determination of soil humus), *Agrokimiya*, 1999, No. 5, p. 91.
12. Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhanova N.I., *Organicheskoe veshchestvo pochv Rossiiskoi Federatsii* (Organic matter of soils of the Russian Federation), Moscow: Nauka, 1996, 256 p.
13. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A., *Nekotorye dannye o stepeni vnutrimolekulyarnoi okislennosti gumusa raznykh tipov pochv (k voprosu o perevodnom koeffitsiente s ugleroda na gumus)* (Some data on the degree of intramolecular oxidation of humus of different types of soils (to the question of the transfer coefficient from carbon to humus)), *Pochvovedenie*, 1967, No. 7, pp. 85–95.
14. Bol'shakov V.A., Sorokin S.E., Svishchev L.E. (Compilers), *Rentgenofluorestantsnyi energodispersionnyi metod analiza pochv v tselyakh kontrolya kachestva ikh zagryaznennosti: Metod. Rekomendatsii* (X-ray fluorescent energy dispersive method of analysis of soils to control the quality of their contamination: Guidelines), Moscow: Pochv. in-t im. V.V. Dokuchaeva, 1982, 48 p.
15. Srapenyants S.A., Brodskii E.S., Klyagin K.N., Shevtsova L.K., *Ekspressnoe opredelenie ugleroda v pochvakh metodom sozhzheniya* (Express determination of carbon in soils by burning method), *Agrokimiya*, 1979, No. 7, pp. 132–137.
16. Vorob'eva L.A. (Ed.), *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* (Theory and practice of chemical analysis of soils), Moscow: GEOS, 2006, 400 p.
17. Titova N.A., Kogut B.M., *Transformatsiya organicheskogo veshchestva pri sel'skokhozyaistvennom ispol'zovanii pochv* (Transformation of organic matter during agricultural use of soils), In: *Itogi nauki i tekhniki (seriya pochvovedenie i agrokimiya)* (Results of science and technology (series of Soil Science and Agrochemistry)), Vol. 8, Moscow: Izd-vo VINITI, 1991, 156 p.
18. Tyurin I.V., *Novoe vidoizmenenie ob'emnogo metoda opredeleniya gumusa s pomoshch'yu khromovoi kisloty* (New modification of volumetric method of determination of humus with chromic acid), *Pochvovedenie*, 1931, No. 5–6, pp. 36–47.
19. Tyurin I.V., *K voprosu o metodike izucheniya organicheskogo veshchestva pochvy v biokhimicheskom otnoshenii* (To a question about methods of study of organic matter of soil in biochemical sense), *Tr. Pochv. in-ta im. V.V. Dokuchaeva*, 1934, Vol. 10(4), pp. 27–37.

20. Tyurin I.V., *Materialy po sravnitel'nomu izucheniyu metodov opredeleniya organicheskogo ugleroda v pochvakh. Metody opredeleniya obshchego organicheskogo ugleroda i uglekisloty karbonatov* (Materials on the comparative study of methods for determining organic carbon in soils. Methods of determining the total organic carbon and carbonate carbonates), In: *Probl. sov. Pochvovedeniya* (Problems of modern soil science), 1936, Collection of articles No. 2, p. 121.
21. Tyurin I.V., *Organicheskoe veshchestvo pochv i ego rol' v pochvoobrazovanii i plodorodii. Uchenie o pochvennom gumuse* (Organic matter of soils and its role in soil formation and fertility. Doctrine of Soil Humus), Moscow–Leningrad: Sel'khozgiz, 1937, 287 p.
22. Chernova O.V., Golozubov O.M., *Vsemirnaya karta zapasov organicheskogo ugleroda v 30 sm sloe pochvy dlya territorii Rossii (proekt FAO OON GSOC17)* (World map of organic carbon stocks in 30 centimeters soil layer for the territory of Russia (UN FAO GSOC17 project)), In: *Sovremennoe sostoyanie chernozemov. Mat-ly II Mezhdunarod. nauchn. konf.* (Modern state of black earth, Proc. of II International scientific conference), Rostov on Don–Taganrog, 2018, Vol. 1, pp. 49–56.
23. Shamrikova E.V., Vanchikova E.V., Kondratenok B.M. et al., Problems and limitations of the dichromatometric method for measuring soil organic matter content: A Review, *Eurasian Soil Sc.*, 2022, No. 55, pp. 861–867, DOI: [10.1134/S1064229322070092](https://doi.org/10.1134/S1064229322070092).
24. Apesteguia M., Plante A.F., Virtoc I., Methods assessment for organic and inorganic carbon quantification in calcareous soils of the Mediterranean region, *Geoderma Regional*, 2018, Vol. 12, pp. 39–48.
25. Blakemore L.C., Searle P.L., Daly B.K., *Methods for chemical analysis of soils*, New Zealand Soil Bureau, Scientific Report 10, Dep. of Sci. and Industrial Res. New Zealand, 1977, 112 p.
26. Ciavatta C., Vittori L. Antisari, Sequi P., Determination of organic carbon in soils and fertilizers, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1989, Vol. 20, Iss. 7–8, pp. 759–773.
27. Jankauskas B., Jankauskiene G., Slepeliene A., Booth C., International comparison of analytical methods of determining the soil organic matter content of Lithuanian Eutric Albeluvisols, *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 2006, Vol. 37, pp. 707–720.
28. Knop W., Ueber die Bedeutung des Humus, *Landw.Vers. Sta.*, 1872, Vol. 15, pp. 13–21.
29. Nelson, D.W., Sommers, L.E., Total carbon, organic carbon, and organic matter, In: Sparks D.L. et al. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*, Part 3, SSSA Book Series, Madison, 1996, pp. 961–1010.

30. Sato J.H., Figueiredo C.C., Marchão R.L., Madari B.E., Benedito L.E.C., Busato J.G., Souza D.M., Methods of soil organic carbon determination in Brazilian savannah soils, *Sci. Agric.*, 2014, Vol. 71, No. 4, pp. 302–308.
31. Yugini Y., Baritz R., Vargas R.R. (Eds.), *Soil Organic carbon mapping*, GSOC Map. cookbook manual, Rome, 2017.
32. Shamrikova E.V., Kondratenok B.M., Tumanova E.A., Vanchikova E.V., Lapteva E.M., Zonova T.V., Lu-Lyan-Min E.I., Davydova A.P., Libohova Z., Suvannang N., Transferability between soil organic matter measurement methods for database harmonization, *Geoderma*, 2022, Vol. 412, 115547.
33. Schollenberger C.J., A rapid approximate method for determining soil organic matter, *Soil Science*, 1927, No. 1, XXIV.
34. Tabatabai M.A., Bremner J.M., Use of the Leco automatic 70-second carbon analyzer for total carbon analyses of soils, *Soil Sci.Soc. Amer. Proc.*, 1970, Vol. 34, No. 4, pp. 608–610.