

УДК 631.41

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-274-292



Ссылки для цитирования:

Беляева С.А., Мамонтов В.Г., Поляков А.М. Элементный состав гумусовых кислот чернозема типичного целинного // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 274-292. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-274-292

Cite this article as:

Belyaeva S.A., Mamontov V.G., Polyakov F.M., The elemental composition of humic acids in typical virgin chernozem, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 274-292, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-274-292

Элементный состав гумусовых кислот чернозема типичного целинного

© 2025 г. С. А. Беляева*, В. Г. Мамонтов**,
А. М. Поляков***

*Российский государственный аграрный университет –
МСХА им. К.А. Тимирязева, Россия,
127434, Москва, ул. Тимирязевская, 49,*

*<https://orcid.org/0000-0003-1347-0741>, e-mail: belyaevasa@inbox.ru,
**<https://orcid.org/0000-0003-2563-8783>, e-mail: mamontov1954@inbox.ru,
***e-mail: amp7616i@rambler.ru.

*Поступила в редакцию 14.03.2024, после доработки 13.06.2024,
принята к публикации 16.09.2025*

Резюме: Цель работы – изучить элементный состав гуминовых кислот (ГК), гиматомелановых кислот (ГМК) и фульвокислот (ФК) чернозема типичного целинного Курской области. Препараты гумусовых кислот получали экстракцией 0.1 н. раствором NaOH из декальцированной навески почвы по традиционной для нашей страны методике, очистку центрифугированием и электродиализом. ГМК экстрагировали из сырого геля этанолом до обесцвечивания раствора. В полученных препаратах гумусовых кислот определяли: зольность – весовым методом, содержание С, Н, N – на автоматическом анализаторе CHNS-varioMicrocube, содержание О находили по разности, степень окисленности и теплоту сгорания – по эмпирическим формулам. Данные элементного состава выражали в массовых и атомных процентах. Самый высокий энергетический потенциал характерен для ГМК, теплота

сгорания 18.71 кДж/г. Самый низкий для ФК – 10.99 кДж/г. Согласно полученным данным, ГК чернозема сформированы в основном соединениями циклического типа и обеднены азотом, о чем свидетельствуют отношения Н : С, равное 0.87 и С : N, имеющее значение 16.5. Величина отношения О : С равна 0.50, а степень окисленности +0.13. ГМК и ФК имеют алифатическую природу – величины атомных отношений Н : С, равны 1.26 и 1.57 соответственно, что согласуется с литературными данными. ФК обогащены кислород- и азотсодержащими группировками, величины атомных отношений О : С и С : N, равны 0.90 и 10.8, степени окисленности +0.24. Среди гумусовых кислот ГМК в наибольшей мере обеднены азотсодержащими группировками, величина отношения С : N равна 22.8. В отличие от ГК и ФК, ГМК являются недоокисленными соединениями, что подтверждает величина отношения О : С – 0.44 и отрицательная степень окисленности -0.37. Таким образом, ГМК еще не прошли полностью этап гумификации. Согласно графико-статистическому анализу, их переход в ГК сопряжен с реакциями деметилирования и окисления, дополняемыми дегидрогенизацией. Переход от ГМК к ФК обусловлен четко выраженным процессом окисления, дополняемым слабо проявляющейся гидратацией. Положение гумусовых кислот на диаграмме в координатах степень окисленности (ω) – величина отношения Н : С свидетельствует, что они не только отличаются качеством структурных компонентов, но и находятся на разных стадиях гумификации.

Ключевые слова: гуминовые кислоты; гиматомелановые кислоты; фульвокислоты; атомные отношения; степень окисленности.

The elemental composition of humic acids in typical virgin chernozem

© 2025 S. A. Belyaeva*, V. G. Mamontov**, A. M. Polyakov***

*Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy,*

49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation,

** <https://orcid.org/0000-0003-1347-0741>, e-mail: belyaevasa@inbox.ru,*

*** <https://orcid.org/0000-0003-2563-8783>, e-mail: mamontov1954@inbox.ru,
*** e-mail: amp7616i@rambler.ru.*

Received 14.03.2024, Revised 13.06.2024, Accepted 16.09.2025

Abstract: The working purpose is to study the elemental composition of humic acids (HA), hymatomelanic acids (HMA) and fulvic acids (FA) in typical virgin chernozem of the Kursk Region. Humus acid preparations were

obtained by extraction with 0.1 N NaOH solution from a decalcified sample of soil according to the traditional method for our country, purification by centrifugation and electrodialysis. HMA were extracted from the crude gel with ethanol until the solution became colorless. In the resulting preparations of humus acids, the following parameters were determined: ash content by gravimetric method; C, H, N content by an automatic CHNS-varioMicrocube analyzer; O content was found as the difference; degree of oxidation and calorific value – by using empirical formulas. Elemental composition data were expressed in mass and atomic percentages. The highest energy potential is typical of HMA, the heat of combustion is 18.71 kJ/g. The lowest for FA is 10.99 kJ/g. According to the obtained data, chernozem HAs are formed mainly by cyclic compounds and are depleted in nitrogen, as evidenced by the H : C ratio (0.87) and C : N ratio (16.5). The O : C ratio is 0.50, and the oxidation degree is +0.13. HMA and FA are aliphatic in origin – the values of the H : C atomic ratios are 1.26 and 1.57, respectively, which corresponds well to the literature data. FAs are enriched with oxygen- and nitrogen-containing groups, the values of the atomic ratios O : C and C : N are 0.90 and 10.8, the degree of oxidation is +0.24. Among humus acids, HMAs are most depleted in nitrogen-containing groups; the C : N ratio is 22.8. Unlike HA and FA, HMA are under-oxidized compounds, which is confirmed by the O : C ratio of 0.44 and the negative degree of oxidation -0.37. Thus, HMAs have not yet completely passed the humification stage. According to the graph-statistical analysis, their transition to HA is associated with demethylation and oxidation reactions, supplemented by dehydrogenation. The transition from HMA to FA is due to a clearly expressed oxidation process, complemented by weakly manifested hydration. The position of humic acids on the diagram in coordinates of the degree of oxidation (ω) – the value of the H : C ratio indicates that they not only differ in the quality of their structural components, but are also at different stages of humification.

Keywords: humic acids; humatemelanolic acids; fulvic acids; atomic ratios; degree of oxidation.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим компонентом органического вещества автоморфных почв являются гумусовые кислоты. От их качественных и количественных особенностей и соотношения между ними прямо или косвенно зависят практически все свойства и режимы почвы. Согласно современным представлениям в составе гумусовых кислот выделяют три группы компонентов: гуминовые кислоты

(ГК), гиматомелановые кислоты (ГМК) и фульвокислоты (ФК) (Орлов и др., 2005). Такая классификация гумусовых кислот почвы является общепринятой в отечественном почвоведении.

Однако при этом необходимо отметить два обстоятельства. Одно из них заключается в том, что ГМК длительное время выделялись не как группа гумусовых веществ, а как спирторастворимая фракция ГК (Кононова, 1963). Лишь сравнительно недавно они были отнесены Д.С. Орловым (Орлов, 1990), по-видимому, преимущественно на основании работ Г.И. Глебовой (Глебова, 1985), в самостоятельную группу гумусовых веществ почвы.

Второе обстоятельство касается ФК. По существу, этим термином в почвоведении обозначается две группы органических веществ почвы (Заварзина и др., 2021). Одна из них – так называемые ФК по Тюрину – представляет собой все кислоторастворимые вещества, выделяемые при анализе фракционно-группового состава гумуса. В ее состав входят как собственно ФК, так и разнообразные неспецифические органические соединения почвы (Орлов, 1990). Сам И.В. Тюрин считал, что образование ФК происходит за счет конденсации продуктов распада полисахаридов (или полиуронидов) с промежуточными продуктами распада белков (Тюрин, 1965).

Вторая группа представлена “истинными” ФК, очистка которых от неспецифических органических соединений осуществляется с помощью смолы DAX-8 или по Форситу путем адсорбции кислого раствора, остающегося после осаждения ГК и ГМК на активированном угле.

Состав и свойства этих двух групп ФК различны (Уланкина, 2002). По сравнению с ФК по Тюрину, ФК по Форситу имеют более высокую оптическую плотность и степень окисленности. Они более однородны по молекулярно-массовому составу и имеют меньшие значения молекулярных масс, что является следствием обогащенности ФК по Тюрину неспецифическими органическими соединениями.

Однако, несмотря на это, следует отметить, что данные именно о содержании ФК по Тюрину используются для оценки качественного состава гумуса, который устанавливают по величине отношения $C_{ГК} : C_{ФК}$ (Орлов и др., 2005; Чеботарев, Лебедева,

2023; Шеуджен и др., 2023).

Представляется, что, несмотря на значительную условность группы ФК по Тюрину, оценка ее состава и свойств может быть перспективной при сравнительных исследованиях как генетического плана, так и при характеристике особенностей агрогенного воздействия на органическое вещество почвы.

Элементный состав является фундаментальной характеристикой любых органических соединений, в том числе и гумусовых кислот почвы. Поэтому не случайно к настоящему времени накоплен большой объем информации, характеризующий особенности элементного состава гумусовых кислот, как почв разных типов, так и других природных объектов (Rice, MacCarthy, 1991; Шигабаева, 2014; Лодыгин и др., 2016; Бажина и др., 2019; Шевцова и др., 2019; Перминова, 2000; Орлов и др., 2005; Завьялова и др., 2022).

При этом следует отметить, что обычно исследователи изучают какую-то одну гумусовую кислоту, реже – две и очень редко в литературе приводятся данные, характеризующие элементный состав всех трех групп гумусовых кислот, экстрагированных из одной почвы (Глебова, 1985; Рыбчук, Смирнова, 2019). Причем до настоящего времени наименее изученной остается группа гиматомелановых кислот почвы.

Цель наших исследований – изучить элементный состав ГК, ГМК и ФК, выделенных из гумусово-аккумулятивного горизонта чернозема типичного целинного.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования служил чернозем типичный мощный тяжелосуглинистый на карбонатном лессовидном суглинке. Название почвы по WRB (2022) – *Haplic Chernozem (Loamic, Pachic)*. Почвенные образцы отбирали в Центрально-Черноземном государственном биосферном заповеднике им. А.А. Алехина на участке целинной некосимой степи из слоя 0–20 см гумусово-аккумулятивного горизонта А. Свойства этого объекта хорошо изучены и неоднократно освещались в литературе (Путеводитель..., 1974; Когут и др., 2019; Мамонтов и др., 2020; Артемьева и др., 2021, 2022). Климат умеренный. Среднегодовая темпе-

ратура воздуха равна +5.8 °С. Среднегодовое количество осадков составляет 570 мм, $C_{орг}$ 4.8–5.1%, pH 6.8–6.9. Почвообразующими породами являются Валдайские лессовидные суглинки тяжелого гранулометрического состава, подстилаемые Днепровскими суглинками среднего гранулометрического состава.

Гумусовые кислоты экстрагировали 0.1 н. раствором NaOH после предварительного декальцинирования навески почвы до предельного извлечения по стандартной методике (Орлов, Гришина, 1981). ГК и ГМК осаждали 10%-ным раствором HCl и отделяли от надосадочной жидкости центрифугированием. Кислый раствор, содержащий ФК по Тюрину, пропускали через катионит в H-форме, упаривали и подвергали электродиализу, после чего высушивали под феном досуха.

Сырой гель, состоящий из ГК и ГМК, растворяли в 0.1 н. растворе NaOH и очищали от коллоидных частиц центрифугированием в течение 30 мин при 8 000 об/мин, после чего пропускали через свечу Шамберлена. ГК и ГМК осаждали из очищенного от коллоидов раствора 10%-ным раствором HCl и отделяли от надосадочной жидкости центрифугированием. Сырой гель ГК и ГМК подвергали электродиализу, после чего экстрагировали ГМК из сырого геля этанолом до обесцвечивания раствора. Высушивали ГК и ГМК на кипящей водяной бане.

В полученных препаратах гумусовых кислот определяли: зольность весовым методом после сухого сжигания, содержание C, H, N на автоматическом анализаторе CHNS-varioMicrocube, содержание O находили по разности, степень окисленности и теплоту сгорания – по эмпирическим формулам (Орлов, Гришина, 1981).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты элементного анализа гумусовых кислот чернозема типичного целинного представлены в таблице 1.

Согласно полученным данным, больше всего гумусовые кислоты содержат углерода – 41.03–57.51 мас. %, вторым по значимости элементом является кислород, количество которого находится в пределах 33.88–49.16 мас. %. Содержание водорода составило 4.05–6.07 мас. %, а азота – 2.54–4.41 мас. %. Такой элемент-

ный состав характерен для гумусовых кислот почвы (Rice, MacCarthy, 1991; Орлов и др., 2005; Мамонтов, 2023).

Таблица 1. Элементный состав гумусовых кислот чернозема типичного целинного, $M \pm m \cdot t_{05}$ (среднее $\pm$ доверительный интервал), мас. %

Table 1. Elemental composition of humic acids in Haplic Chernozem, $M \pm m \cdot t_{05}$ (average $\pm$ confidence interval), wt. %

Вари- -ант	Зольность, %	C	H	N	O
ГК	1.81 ± 0.02	55.36 ± 0.05	4.05 ± 0.11	3.95 ± 0.03	36.64 ± 0.08
ГМК	1.50 ± 0.02	57.51 ± 0.24	6.07 ± 0.09	2.54 ± 0.09	33.88 ± 0.05
ФК	4.50 ± 0.01	41.03 ± 0.02	5.40 ± 0.01	4.41 ± 0.05	49.16 ± 0.02

При этом между гумусовыми кислотами имеются довольно существенные различия. Больше всего углерода – 57.51 мас. % содержат ГМК. Это на 4% больше, чем у ГК, и почти на 30% больше, чем у ФК. По содержанию водорода ФК и ГМК не очень существенно различаются между собой, тогда как ГК содержат на 25–33% меньше этого элемента. Содержание кислорода самое высокое у ФК – 49.16 мас. %, что более чем на 25% выше, чем у ГК и ГМК. Самое низкое содержание кислорода присуще ГМК, на 6% меньше, чем у ГК, относительно ФК. ФК содержат больше всего азота – 4.41 мас. %, у ГК его количество меньше на 10%, тогда как у ГМК более чем на 40%.

Таким образом, отличие ГМК от ГК по элементному составу заключается в меньшем содержании азота и особенно кислорода и более высоком содержании углерода и водорода, что согласуется с литературными данными (Глебова, 1985; Рыбачук, Смирнова, 2019). Хотя по содержанию водорода ФК и ГМК сближаются между собой, по содержанию других химических элементов, особенно углерода и кислорода, они заметно отличаются друг от друга.

Гумусовые кислоты являются важным источником энергии, сведения о которой необходимы для разработки вопросов энергетики почвообразования. Такие данные могут быть получены на основании их теплоты сгорания, рассчитанной по элементному

составу гумусовых кислот, выраженному в мас. % (Ковда, 1973; Орлов и др., 2005). Величины теплоты сгорания гумусовых кислот чернозема типичного целинного приведены в таблице 2.

Таблица 2. Теплота сгорания гумусовых кислот чернозема типичного целинного, $M \pm m \cdot t05$ (среднее $\pm$ доверительный интервал), кДж/г.

Table 2. Heat of combustion of humic acids in Haplic Chernozem, $M \pm m \cdot t05$ (average $\pm$ confidence interval), kJ/g.

ГК	ГМК	ФК
18.31 ± 0.04	18.71 ± 0.01	10.99 ± 0.04

Как следует из полученных данных, самая высокая теплота сгорания – 18.71 кДж/г присуща ГМК, у ГК она близка к этому показателю и составила 18.31 кДж/г. Самый низкий энергетический потенциал характерен для ФК. Он почти на 40% меньше, чем у ГК и ГМК.

Считается, что результаты, выраженные в мас. %, не дают истинного представления об особенностях элементного состава гумусовых веществ. Оно может быть получено лишь в том случае, когда элементный состав выражают в ат. % (Орлов, 1990). Полученные данные представлены в таблице 3.

Таблица 3. Элементный состав гумусовых кислот чернозема типичного целинного, $M \pm m \cdot t05$ (среднее $\pm$ доверительный интервал), ат. %

Table 3. Elemental composition of humic acids in Haplic Chernozem, $M \pm m \cdot t05$ (average $\pm$ confidence interval), at. %

Вариант	С	Н	Н	О
ГК	41.2 ± 0.4	35.8 ± 0.5	2.5 ± 0.1	20.5 ± 0.3
ГМК	36.5 ± 0.4	45.8 ± 0.5	1.6 ± 0.1	16.1 ± 0.1
ФК	28.1 ± 0.3	44.0 ± 0.3	2.6 ± 0.1	25.3 ± 0.2

Согласно полученным данным, в элементном составе ГК чернозема типичного целинного преобладает углерод, содержание

которого составило 41.2 ат. %. В то время как в элементном составе ФК и ГМК превалирует водород – 44.0 и 45.8 ат. % соответственно, что на 19–22% больше, чем в ГК. Эти кислоты содержат меньше углерода, чем ГК, ГМК на 11%, а ФК – на 32%.

Среди всех гумусовых кислот чернозема самое высокое содержание кислорода присуще ФК – 25.3 ат. %, что на 19% больше, чем у ГК и на 36%, чем у ГМК. Самое низкое количество азота содержат ГМК – 1.6 ат. %, в то время как в ФК и ГК его содержание больше на 62% и 56% соответственно.

Таким образом, судя по элементному составу гумусовых кислот чернозема типичного целинного, выраженному в ат. %, ГМК заметно отличаются от ГК. Они содержат на 22% больше водорода, но меньше азота (на 56%), кислорода (на 17%) и углерода (на 11%) и могут быть отнесены к самостоятельной группе гумусовых кислот почвы.

Одним из способов интерпретации данных элементного состава гумусовых веществ в ат. % является нахождение атомных отношений, позволяющих получить определенное представление о строении их молекул (табл. 4).

Таблица 4. Атомные отношения и степень окисленности гумусовых кислот чернозема типичного целинного

Table 4. Atomic ratios and degree of oxidation of humic acids in Haplic Chernozem

Вариант	H : C	O : C	C : N	ω
ГК	0.87 ± 0.03	0.50 ± 0.01	16.5 ± 0.2	$+0.13 \pm 0.03$
ГМК	1.26 ± 0.03	0.44 ± 0.01	22.8 ± 0.8	-0.37 ± 0.02
ФК	1.57 ± 0.02	0.90 ± 0.02	10.8 ± 0.4	$+0.24 \pm 0.01$

Гумусовые кислоты чернозема типичного целинного заметно различаются между собой величинами атомных отношений и степенью окисленности. Судя по величине атомного отношения H : C, равному 0.87, молекулы ГК чернозема сформированы в основном циклическими структурами при заметном вкладе в состав

молекул алифатических компонентов. При этом довольно большая величина отношения $C : N$, оказавшаяся равной 16.5, свидетельствует об очень низкой обогащенности ГК азотсодержащими группировками. Величина отношения $O : C$ равна 0.50, а степень окисленности +0.13.

ГМК и ФК заметно отличаются от ГК своей алифатической природой, о чем свидетельствуют величины атомных отношений $H : C$, равные 1.26 и 1.57 соответственно. Обусловлено это обогащенностью ГМК фрагментами углеводного типа, а ФК значительным количеством неспецифических органических соединений. Наряду с этим, по сравнению с ГК, молекулы ФК гораздо в большей мере обогащены кислород- и азотсодержащими группировками. Об этом можно судить по величинам атомных отношений $O : C$ и $C : N$, равным 0.90 и 10.8 соответственно, и степени окисленности, находящейся на уровне +0.24. ГМК присуща самая низкая величина отношения $O : C$ (0.44) и отрицательная степень окисленности, равная -0.37. Среди гумусовых кислот они в наибольшей мере обеднены азотсодержащими группировками, о чем свидетельствует величина отношения $C : N$, являющаяся самой высокой и достигающая 22.8 (Глебова, 1985).

Таким образом, между гумусовыми кислотами чернозема типичного целинного имеются как сходства, так и различия. Если ГК и ФК являются окисленными соединениями, то ГМК, в отличие от них, содержат в своем составе значительное количество недоокисленных компонентов. С другой стороны, в составе молекул ФК и ГМК отчетливо преобладают алифатические структуры, тогда как молекулы ГК преимущественно сформированы соединениями циклического типа. ФК заметно отличаются от ГК и ГМК гораздо более высоким вкладом азотсодержащих группировок в построение их молекул. Если обогащенность ФК азотом средняя, то ГК и ГМК – очень низкая (Орлов и др., 2004).

Одним из способов интерпретации элементного состава гумусовых кислот является графико-статистический анализ, позволяющий выявить основные химические изменения и процессы, происходящие с ними при гумификации (Орлов и др., 2005; Черников, 2005).

Оценка элементного состава гумусовых кислот чернозема с

помощью графико-статистического анализа показала, что на диаграмме атомных отношений $H:C$ и $O:C$ они занимают три обособленные области (рис. 1). В самой нижней части диаграммы расположены ГК, ГМК и ФК отчетливо сдвинуты вверх и в стороны.

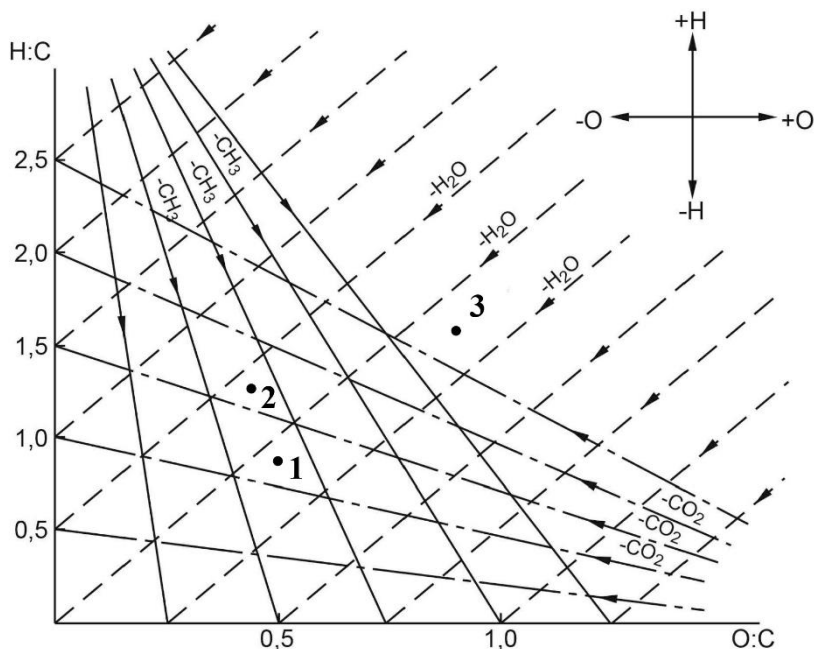


Рис. 1. Диаграмма атомных отношений $H:C - O:C$ (по Д. Ван Кревелену): 1 – ГК, 2 – ГМК, 3 – ФК.

Fig. 1. Diagram of atomic ratios $H:C - O:C$ (according to D. Van Krevelen): 1 – HA, 2 – HMA, 3 – FA.

Гумификация по своей природе процесс окислительный (Александрова, 1980; Орлов и др., 2005). Поэтому можно предположить, что ГМК, которые характеризуются довольно высокой отрицательной степенью окисленности, еще не прошли полностью этап гумификации. Согласно графико-статистическому анализу,

их переход в ГК сопряжен с отчетливо выраженными реакциями деметилирования и окисления, дополняемыми дегидрогенизацией.

Считается, что в почве ГК и ФК образуют единую систему, в которой ГК связывают в комплексы определенное количество ФК в соответствии с условиями температуры и влажности в “момент” образования (Дергачева, 2008). Обособление ФК от ГК, согласно графико-статистическому анализу, происходит благодаря процессам гидратации и окисления. Переход от ГМК к ФК обусловлен четко выраженным процессом окисления, дополняемым слабо проявляющейся гидратацией.

Для характеристики элементного состава гумусовых кислот чернозема наряду с графико-статистическим анализом была использована диаграмма, предложенная Глебовой (Глебова, Орлов, 1980), для построения которой используется величина отношения $H : C$ и степень окисленности (рис. 2).

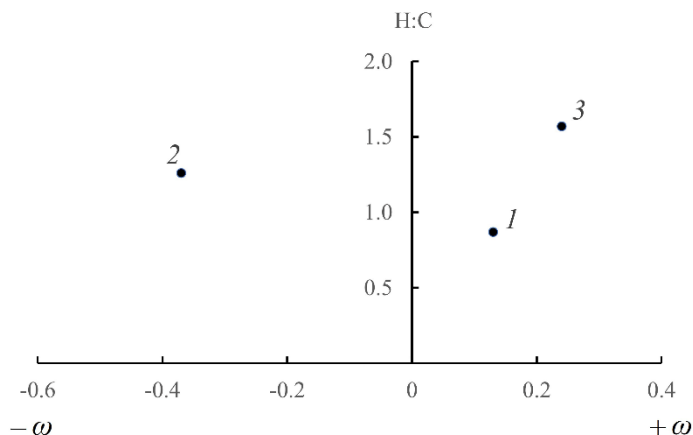


Рис. 2. Диаграмма атомных отношений $H : C$ и степени окисленности: 1 – ГК, 2 – ГМК, 3 – ФК.

Fig. 2. Diagram of atomic ratios $H : C$ and degree of oxidation: 1 – HA, 2 – HMA, 3 – FA.

На рисунке 2 отчетливо обнаруживаются разные области приуроченности гумусовых кислот на диаграмме в соответствии с неодинаковой их обогащенностью алифатическими и кислородсодержащими группировками и степенью окисленности. Это, вероятно, может служить не только подтверждением различий в качестве структурных компонентов, формирующих гумусовые кислоты чернозема, но и указанием на то, что они находятся на разных стадиях гумификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гумусовые кислоты чернозема типичного целинного имеют как сходства, так и различия. ГК чернозема сформированы в основном соединениями циклического типа, тогда как в составе молекул ФК и ГМК отчетливо преобладают алифатические структуры. ФК заметно отличаются от ГК и ГМК гораздо более высоким вкладом азотсодержащих группировок в строение их молекул. Если ГК и ФК являются окисленными соединениями, то ГМК, в отличие от них, содержат в своем составе значительное количество недоокисленных компонентов.

Самый высокий энергетический потенциал характерен для ГМК, самый низкий – для ФК.

ГМК заметно отличаются от ГК и могут быть отнесены к самостоятельной группе гумусовых кислот почвы.

Гумусовые кислоты чернозема типичного не только различаются качеством структурных компонентов, формирующих их молекулы, они находятся на разных стадиях гумификации. ГМК, которые характеризуются высокой отрицательной степенью окисленности, еще не прошли полностью этап гумификации. Их переход в ГК сопряжен с отчетливо выраженными реакциями деметилирования и окисления, дополняемыми дегидрогенизацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александрова Л.Н.* Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 288 с.
2. *Артемова З.С., Данченко Н.Н., Зазовская Э.П., Колягин Ю.Г., Кириллова Н.П., Козут Б.М.* Изотопный состав углерода и химическая структура органического вещества типичного чернозема в условиях

- контрастного землепользования // Почвоведение. 2021. № 6. С. 686–700. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21060034>.
3. *Артемова З.С., Зазовская Э.П., Засухина Е.С., Цомаева Е.В., Козут Б.М.* Изотопный состав углерода пулов органического вещества типичного чернозема // Вестник Московского Университета. Серия 17. Почвоведение. 2022. № 4. С. 54–62.
4. *Бажина Н.Л., Захарова Е.С., Дергачева М.И.* Сравнительный анализ гумусовой составляющей тундровых почв Тувы и горного Алтая, сформировавшихся в одинаковых экологических условиях // Научные ведомости. Сер. Естественные науки. 2019. Т. 43. № 4. С 337–343. DOI: <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-4-337-34>.
5. *Глебова Г.И.* Гиматомелановые кислоты почв. М.: Изд-во МГУ, 1985. 74 с.
6. *Глебова Г.И., Орлов Д.С.* Элементный состав и коэффициенты экстинккции гиматомелановых кислот // Научные доклады Высшей школы. Биологические науки. 1980. № 9. С. 95–107.
7. *Дергачева М.И.* Гумусовая память почв // Память почв: Почва как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий. М.: Издательство ЛКИ, 2008. С. 530–560.
8. *Заварзина А.Г., Данченко Н.Н., Демин В.В., Артемова З.С., Козут Б.М.* Гуминовые вещества – гипотезы и реальность (обзор). // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1449–1480. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21120169>.
9. *Завьялова Н.Е., Васбиева М.Т., Фомин Д.С.* Элементный состав и структура гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы длительного стационарного опыта и ее целинных аналогов // Агрохимия. 2022. № 9. С. 15–25. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188122090149>.
10. *Ковда В.А.* Основы учения о почвах. М.: Наука, 1975. Т. 1. 448 с.
11. *Козут Б.М., Артемова З.С., Кириллова Н.П., Яшин М.А., Сошникова Е.И.* Компонентный состав органического вещества воздушно-сухих и водоустойчивых макроагрегатов типичного чернозема в условиях контрастного землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 161–170. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106422931902008X>.
12. *Кононова М.М.* Органическое вещество почвы. Его природа, свойства и методы изучения. М.: АН СССР, 1963. 315 с.
13. *Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А., Василевич Р.С.* Изучение элементного состава гуминовых и фульвокислот почв таежных и тундровых ландшафтов // Вестник ИБ Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 4(198). С. 10–18.
14. *Мамонтов В.Г.* Общее почвоведение. М.: КНОРУС, 2023. 554 с.
15. *Мамонтов В.Г., Артемова З.С., Лазарев В.И., Родионова Л.П., Крылов В.А., Ахмедзянова Р.Р.* Сравнительная характеристика свойств

целинного, пахотного и залежного чернозема типичного Курской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 182–201. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-182-201>.

16. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 325 с.

17. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М.: МГУ, 1981. 272 с.

18. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.

19. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И. Химия почв. М.: Высш. шк., 2005. 558 с.

20. Перминова И.В. Анализ, классификация и прогноз свойств гумусовых кислот: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М., 2000. 50 с.

21. Путеводитель почвенной экскурсии “Восточно-Европейская равнина. Лесостепная и степная зоны”. М.: Наука, 1974. 96 с.

22. Рыбачук О.В., Смирнова А.О. Гиматомелановые кислоты почв // Инновации и инвестиции. 2019. № 12. С. 197–199.

23. Тюрин И.В. Органическое вещество почвы и его роль в плодородии. М.: Наука, 1965. 320 с.

24. Уланкина А.В. Сравнительная характеристика фульвокислот, выделенных по методам Тюрина и Форсита: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2002. 24 с.

25. Чеботарев Н.Т., Лебедева С.С. Особенности трансформации гумусовых веществ дерново-подзолистой почвы при агрогенных воздействиях на территории Республики Коми // Агрохимический вестник. 2023. № 3. С. 16–19. DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-3-004>.

26. Черников В.А. Методы структурной диагностики органического вещества почв // Методы исследования органического вещества почв. М., 2005. С. 135–147.

27. Шевцова Л.К., Черников В.А., Сычев В.Г., Беличенко М.В., Рухович О.В., Иванова О.И. Влияние длительного применения удобрений на состав, свойства и структурные характеристики гумусовых кислот основных типов почв. Сообщение I // Агрохимия. 2019. № 10. С. 3–15.

28. Шеуджен А.Х., Гуторова О.А., Хурум Х.Д., Ашинов Ю.Н. Изменение свойств лугово-черноземной почвы рисового агроценоза при применении удобрений // Плодородие. 2023. № 2(131). С. 80–82. DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.131.18>.

29. Шигабаева Г.Н. Элементный состав и содержание функциональных групп гуминовых веществ почв и торфов различного происхождения // Вестник Тюменского гос. ун-та. 2014. № 12. Экология. С. 45–53.
30. Rice J.A., MacCarthy P. Statistical evaluation of the elemental composition of humic substances // Org. Geochem. 1991. Vol. 17. No. 5. P. 635–648. DOI: [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(91\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0146-6380(91)90006-6).

REFERENCES

1. Aleksandrova L.N., *Organicheskoe veshchestvo pochvy i protsessy ego transformatsii* (Soil organic matter and its transformation processes), Leningrad: Nauka, 1980, 288 p.
2. Artem'eva Z.S., Danchenko N.N., Zazovskaya E.P., Kolyagin Yu.G., Kirillova N.P., Kogut B.M., Izotopnyi sostav ugleroda i khimicheskaya struktura organicheskogo veshchestva tipichnogo chernozema v usloviyakh kontrastnogo zemlepol'zovaniya (Natural ^{13}C Abundance and Chemical Structure of Organic Matter of Haplic Chernozem under Contrasting Land Uses), *Pochvovedenie*, 2021, No. 6, pp. 686–700, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21060034>.
3. Artem'eva Z.S., Zazovskaya E.P., Zasukhina E.S., Tsomaeva E.V., Kogut B.M., Izotopnyi sostav ugleroda pulov organicheskogo veshchestva tipichnogo chernozema (Natural ^{13}C Abundance of the organic matter pools in Haplic Chernozem), *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2022, No. 4, pp. 54–62.
4. Bazhina N.L., Zakharova E.S., Dergacheva M.I., Sravnitel'nyi analiz gumusovoi sostavlyayushchei tundrovyykh pochv Tuvy i gornogo Altaya, sformirovavshikhsya v odinakovykh ekologicheskikh usloviyakh (Comparative analysis of the humus component of tundra soils of Tuva and Gorny Altai, formed in the same ecological conditions), *Nauchnye vedomosti. Ser. Estestvennye nauki*, 2019, Vol. 43, No. 4, pp. 337–343, DOI: <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-4-337-34>.
5. Glebova G.I., *Gimatomelanovye kisloty pochv* (Himatomelanolic acids of soils), Moscow: Moscow State University, 1985, 74 p.
6. Glebova G.I., Orlov D.S., Elementnyi sostav i koeffitsienty ekstinktsii gimatomelanovykh kislot (Elemental composition and extinction coefficients of himatomelanolic acids), *Nauchnye doklady Vysshei shkoly. Biologicheskie nauki*, 1980, No. 9, pp. 95–107.
7. Dergacheva M.I., Gumusovaya pamyat' pochv (Humus memory of soils), In: *Pamyat' pochv: Pochva kak pamyat' biosferno-geosferno-antroposfernykh vzaimodeistvii* (Soil memory. Soil as a memory of Biosphere-Geosphere-Anthroposphere interactions), Moscow: Izdatel'stvo LKI, 2008, pp. 530–560

(687 p.)

8. Zavarzina A.G., Danchenko N.N., Demin V.V., Artem'eva Z.S., Kogut B.M., Guminovye veshchestva – gipotezy i real'nost' (obzor) (Humic substances – hypotheses and reality (review)) *Pochvovedenie*, 2021, No. 12, pp. 1449–1480, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21120169>.

9. Zav'yalova N.E., Vasbieva M.T., Fomin D.S., Elementnyi sostav i struktura guminovykh kislot dernovo-podzolistoi pochvy dlitel'nogo statsionarnogo opyta i ee tselinnykh analogov (Elemental composition and structure of humic acids in soddy-podzolic soil of long-term stationary experiment and its virgin analogues), *Agrokhiimiya*, 2022, No. 9, pp. 15–25, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188122090149>.

10. Kovda V.A., *Osnovy ucheniya o pochvakh* (Fundamentals of soil science), Moscow: Nauka, 1975, Vol. 1, 448 p.

11. Kogut B.M., Artem'eva Z.S., Kirillova N.P., Yashin M.A., Soshnikova E.I., Komponentnyi sostav organicheskogo veshchestva vozdušno-sukhikh i vodoustoichivyykh makroagregatov tipichnogo chernozema v usloviyakh kon-trastnogo zemlepol'zovaniya (Organic matter of the air-dried and water-stable macroaggregates of haplic chernozem in contrasting variants of land use), *Pochvovedenie*, 2019, No. 2, pp. 161–170, DOI: <https://doi.org/10.1134/S106422931902008X>.

12. Kononova M.M., *Organicheskoe veshchestvo pochvy. Ego priroda, svoystva i metody izucheniya* (Soil organic matter. Its nature, properties and methods of study), Moscow: AN SSSR, 1963, 315 p.

13. Lodygin E.D., Beznosikov V.A., Vasilevich R.S., Izuchenie elementnogo sostava guminovykh i ful'vokislot pochv taezhnykh i tundrovyykh landshaftov (Research of the elemental composition of humic and fulvic acids in soils of taiga and tundra landscapes), *Vestnik IB Komi NTs UrO RAN*, 2016, No. 4(198), pp. 10–18.

14. Mamontov V.G., *Obshchee pochvovedenie* (General soil science), Moscow: KNORUS, 2023, 554 p.

15. Mamontov V.G., Artemyeva Z.S., Lazarev V.I., Rodionova L.P., Krylov V.A., Ahmetzyanova R.R., Comparative characteristics of the properties of Halpic Chernozem of the Kursk Region of different land use, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, pp. 182–201, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-182-201>.

16. Orlov D.S., *Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii* (Humic acids of soils and the general theory of humification), Moscow: Moscow State University, 1990, 325 p.

17. Orlov D.S., Grishina L.A., *Praktikum po khimii gumusa* (Laboratory manual on humus chemistry), Moscow: Moscow State University, 1981, 272 p.

18. Orlov D.S., Biryukova O.N., Rozanova M.S., *Dopolnitel'nye pokazateli gumusnogo sostoyaniya pochv i ikh geneticheskikh gorizontov* (Revised system of the humus status parameters of soils and their genetic horizons), *Pochvovedenie*, 2004, No. 8, pp. 918–926.
19. Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Sukhanova N.I., *Khimiya pochv* (Soil chemistry), Moscow: Vyssh. shk., 2005, 558 p.
20. Perminova I.V., *Analiz, klassifikatsiya i prognoz svoystv gumusovykh kislot: Avtoref. diss... dokt. khim. nauk* (Analysis, classification and prediction of humic acid properties, Extended abstract of Dr. Chem. Sci. thesis), Moscow, 2000, 50 p.
21. X Mezhdunar. kongress pochvovedov, *Putevoditel' pochvennoi ekskursii "Vostochno-Evropeiskaya ravnina. Lesostepnaya i stepnaya zony"* (Guide to the soil excursion "East European Plain. Forest-steppe and steppe zones"), Moscow: Nauka, 1974, 96 p.
22. Rybachuk O.V., Smirnova A.O., *Gimatomelanovye kisloty pochv* (Hymatomelaninic acids of soils), *Innovatsii i investitsii*, 2019, No. 12, pp. 197–199.
23. Tyurin I.V., *Organicheskoe veshchestvo pochvy i ego rol' v plodorodii* (Soil organic matter and its role in fertility), Moscow: Nauka, 1965, 320 p.
24. Ulankina A.V., *Sravnitel'naya kharakteristika ful'vokislot, vydelennykh po metodam Tyurina i Forsita. Avtoref. diss... kand. biol. nauk* (Comparative characteristics of fulvic acids isolated by Tyurin and Forsyth methods, Extended abstract of Cand. biol. sci. thesis), Moscow, 2002, 24 p.
25. Chebotarev N.T., Lebedeva S.S., *Osobennosti transformatsii gumusovykh veshchestv dernovo-podzolistoi pochvy pri agrogennykh vozdйствиyakh na territorii Respubliki Komi* (Peculiarities of humic compounds transformation in soddy-podzolic soil under agrogenic pressure in the Komi Republic), *Agrokhimicheskii vestnik*, 2023, No. 3, pp. 16–19, DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-3-004>.
26. Chernikov V.A., *Metody strukturnoi diagnostiki organicheskogo veshchestva pochv* (Methods of structural diagnostics of soil organic matter), In: *Metody issledovaniya organicheskogo veshchestva pochv* (Methods of soil organic matter research), Moscow, 2005, pp. 135–147.
27. Shevtsova L.K., Chernikov V.A., Sychev V.G., Belichenko M.V., Rukhovich O.V., Ivanova O.I., *Vliyanie dlitel'nogo primeneniya udobrenii na sostav, svoystva i strukturnye kharakteristiki gumusovykh kislot osnovnykh tipov pochv* (Effect of long-term application of fertilizers on the composition, properties and structural characteristics of humic acids in main soil types. Report 1), *Agrokhimiya*, 2019, No. 10, pp. 3–15.
28. Sheudzhzen A.Kh., Gutorova O.A., Khurum Kh.D., Ashinov Yu.N., *Izmenenie svoystv lugovo-chernozemnoi pochvy risovogo agrotsenoza pri*

- primenenii udobrenii (Changes in the properties of meadow-chernear soil of the rice agrocenosis with the application of fertilizers), *Plodorodie*, 2023, No. 2(131), pp. 80–82, DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.131.18>.
29. Shigabaeva G.N., Elementnyi sostav i sodержanie funktsional'nykh grupp guminovykh veshchestv pochv i torfov razlichnogo proiskhozhdeniya (Elemental composition and level of functional groups of humic substances in soils and turfs of different origin), *Vestnik Tyumenskogo gos. un-ta, Ecology*, 2014, No. 12, pp. 45–53.
30. Rice J.A., MacCarthy P., Statistical evaluation of the elemental composition of humic substances, *Org. Geochem*, 1991, Vol. 17, No. 5, pp. 635–648, DOI: [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(91\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0146-6380(91)90006-6).