

Торф и продукты его переработки

УДК 661.152.4

ТРАНСФОРМАЦИЯ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ В СОСТАВЕ ЖИДКИХ ГУМИНОВЫХ УДОБРЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ХРАНЕНИЯ

© Д.В. Дудкин*, Л.А. Журавлева, Б.А. Шишадский, Н.Г. Таныкова

Сургутский государственный университет, пр. Ленина, 1, Сургут, 628406,
Россия, dvdudkin@rambler.ru

Предметом исследования являются жидкие гуминовые удобрения, полученные по оригинальной механохимической технологии на основе торфяного и растительного сырья. Цель исследования – оценить влияние длительного воздействия водных растворов щелочи в процессе хранения на химический состав гуминовых веществ, входящих в состав жидких гуминовых удобрений. Изучено изменение химического состава действующих веществ удобрений «Лигновит» и «Гумовит» (ООО ХимТехнологии, Ханты-Мансийск) со сроком хранения более двух лет. Установлено снижение молекулярной массы гуминовых кислот (ГК) в составе жидких гуминовых удобрений, обусловленное гидролитической деструкцией их периферической и каркасной частей. Деструктивные гидролитические процессы обусловлены длительным воздействием водно-щелочного раствора, входящего в состав жидкого удобрения. Методом ИК-спектроскопии показано, что гидролитическая деструкция обусловлена разрушением простых и сложных эфирных связей в структуре молекул гуминовых кислот. Отмечено снижение количества карбоксильных и карбонильных групп, указывающее на частичное декарбоксилирование ГК в процессе хранения. На примере роста микро- и макромицетов, использованных в опыте в качестве биоиндикаторов, установлено, что длительное хранение жидкого гуминового удобрения, превышающее его срок годности, не оказывает негативного воздействия на уровень его биологической активности в отношении данной группы организмов.

Ключевые слова: гуминовые кислоты, гуминовые удобрения, торф, хранение, биологическая активность, деструкция, периферическая часть.

Для цитирования: Дудкин Д.В., Журавлева Л.А., Шишадский Б.А., Таныкова Н.Г. Трансформация гуминовых кислот в составе жидких гуминовых удобрений в процессе их хранения // Химия растительного сырья. 2024. №3. С. 320–327. DOI: 10.14258/jcprm.20240312635.

Введение

Жидкие гуминовые удобрения получили широкое распространение в растениеводстве [1–9]. Непрерывно ведется работа по повышению эффективности как самих препаратов, так и способов их применения [2–9]. Технология производства гуминовых препаратов, основанная на водно-щелочной экстракции, в результате реализации которой получают конечную продукцию в жидкой форме, накладывает ограничение на срок годности удобрений. При этом в научной литературе отсутствуют данные об изменениях химического состава действующих веществ данного класса удобрений в результате их длительного хранения. В этой связи данное исследование нацелено на изучение негативного гидролитического воздействия остаточных количеств щелочи в составе жидкого удобрения в процессе его длительного хранения в условиях нерегулируемых положительных температур. В качестве объекта исследования были выбраны жидкие гуминовые удобрения «Гумовит» и «Лигновит», полученные по авторской технологии [10–15].

Экспериментальная часть

Гуминовые кислоты извлекали из жидкого гуминового удобрения путем осаждения, подкислением раствора серной кислотой до pH 1–2 с последующим центрифугированием осадка [16]. Спектры поглощения ГК в видимой и УФ-области получали на спектрофотометре СФ-2000 в кварцевых кюветах толщиной 1 см. Для анализа готовили 0,005% раствор исследуемого гумата [16]. Для регистрации ИК-спектра готовили

* Автор, с которым следует вести переписку.

смесь, состоящую из КВг и исследуемого образца ГК (0.4%масс.), из которой прессовали таблетки (~250 мг) под давлением 8 атм. Спектр регистрировали на ИК-спектрометре с преобразованием Фурье «IRAffinity-1S» фирмы «Shimadzu» в интервале частот 4000–400 cm^{-1} . Термогравиметрический анализ гуминовых кислот проводился на дифференциальном сканирующем колориметре «Mettler Toledo DSC822e». Скорость подъема температуры составляла 5 °С в минуту, интервал – от 30 до 850 °С. Молекулярная масса гуминовых кислот определялась вискозиметрическим методом согласно рекомендациям Д.С. Орлова.

Оценка биологической активности жидких гуминовых удобрений по прошествии двух лет хранения препарата «Гумовит» (гумата аммония) была выполнена ранее на 4 видах почвенных микромицетов: Аспергилл земляной (*Aspergillus terreus*), Пеницилл охро-зеленый (*Penicillium ochrochloron*), Пеницилл фуникулезный (*Penicillium funiculosum*), Пециломицес (*Paecilomyces variotii*) и 2 вида дереворазрушающих микромицетов: Щелелистник обыкновенный (*Shizophyllum commune*), Трутовик березовый (*Fomitopsis betulina*) [17]. Аналогичные исследования выполнены в отношении оценки биологической активности «Лигновит» (гумат калия) по прошествии 2 лет хранения.

Ростовые характеристики грибов на агарилизованной среде в чашках Петри исследовали под воздействием 0.02% раствора гумата аммония, а также без него. Измерения радиального роста колоний производили каждые двое суток на протяжении 2–3 недель или до полного зарастания чашки Петри. Среднюю скорость роста мицеллия рассчитали для десяти чашек Петри.

Обсуждение результатов

Вискозиметрическое определение молекулярной массы ГК, выделенной из исследуемых жидких гуминовых удобрений (табл. 1), указывает на течение щелочной гидролитической деструкции полимера в процессе хранения препаратов.

При этом оба препарата имеют принципиально разную устойчивость к разрушающему гидролитическому воздействию водно-щелочной среды удобрения. Оба удобрения получены на единой технологической платформе, однако с использованием различного сырья и природы основания. Так, «Гумовит» – это гумат аммония в водном растворе аммиака, полученный из верховых сфагновых торфов низкой и средней степени разложения [18]. «Лигновит» – это гумат калия в водном растворе калийной щелочи, полученный из смеси коры и корки сосны обыкновенной и верховых сфагновых торфов низкой степени разложения [19].

Согласно полученным данным, тип основания не оказывает роли на динамику гидролиза. Так, применение аммиака, обладающего меньшим гидролитическим действием, приводит к более значительному снижению молекулярной массы полимера. Предполагается, что столь существенные различия обусловлены отличием в строении гуминовых кислот исследуемых удобрений. Так, использование аммиака в качестве щелочной среды при производстве гумата аммония, позволяет ввести в два раза больше органических форм азота. При этом порядка 60% представлено легко- и трудногидролизуемыми формами азота [20]. Гумат калия, полученный на основе водно-щелочного раствора, напротив, содержит азот преимущественно в негидролизуемой форме (55–60%) [20]. Действующие вещества исследуемых удобрений существенно отличаются по элементному составу, соотношению ядровой (каркасной) и периферических частей, по степени окисленности и по расчетным значениям теплоты сгорания [21]. Авторы полагают, что формирование полимерной структуры молекул гуминовых кислот в аммиаке протекает в значительной мере за счет образования большого количества гетероцептных форм азота с участием амидных связей. Это, в свою очередь, приводит к образованию молекулы вдвое крупнее по размеру, чем в гидроксиде калия. Однако нестабильность подобного рода связей к гидролитическому действию щелочей приводит к снижению массы макромолекулы ГК в 4 раза. У гумата калия этих связей нет, и потеря его массы в более агрессивной щелочной среде составляет лишь 10%.

На основании данных термогравиметрического анализа в соответствии с ГОСТ 29127-91 рассчитаны изменения массовых долей каркасной и периферической частей макромолекул ГК (табл. 2).

Согласно представленным данным, гидролитическая деструкция затрагивает как периферическую, так и каркасную части молекул ГК. Однако вовлеченность ядровой части в процессы щелочной гидролитической деструкции более выражена. Предположительно, это связано со щелочным гидролизом эфирных связей в ГК. Возможность образования сложноэфирных связей в процессе окислительной деструкции фенил-пропановых единиц лигнина при механохимическом воздействии была показана ранее [22].

Электронная спектроскопия – широко распространенный метод при описании строения органического вещества почвы. Метод позволяет описать степень зрелости ГК посредством оценки соотношения каркасной и периферической частей молекулы. На основании полученных электронных спектров определены основные спектральные характеристики – коэффициент цветности $Q = E_{465}/E_{650}$ и коэффициент экстинкции E_{465} . Коэффициент экстинкции характеризует развитость системы сопряженных связей в молекуле. По коэффициенту цветности можно оценить соотношение ароматических и алифатических фрагментов в молекулах ГК.

Полученные численные значения данных коэффициентов представлены в таблице 3.

Согласно представленным данным, в процессе хранения коэффициент цветности увеличивается в 1.3 и 1.6 раза. Это свидетельствует о заметном росте количества ароматических фрагментов и(или) снижении массовой доли алифатических фрагментов ГК. Снижение коэффициента экстинкции для удобрения «Гумовит» в процессе его хранения можно объяснить потерей части сильно окрашенных иминов в результате гидролитической деструкции ГК.

Изменения функционального состава гуминовых кислот оценены на основании данных ИК-спектроскопии. Оценка изменения функционального состава выполнена на отнесении интенсивности характеристических полос поглощения к интенсивностям полос поглощения при волновых числах 1610 (валентные колебания C=C ароматических фрагментов) и 2920 cm^{-1} (валентные асимметричные колебания CH₂ алифатических фрагментов) [23–25], интерпретируемых, как доля ядерной и периферической части молекул ГК в ИК-спектрах (табл. 4).

Таблица 1. Изменение молекулярной массы ГК жидких гуминовых удобрений в процессе хранения

Название образца		Молекулярная масса, г/моль
ГК, выделенные из удобрения «Лигновит»	в день получения	51000
	по истечении срока годности (спустя 2 года хранения)	46000
ГК, выделенные из удобрения «Гумовит»	в день получения	105500
	по истечении срока годности (спустя 2 года хранения)	25000

Таблица 2. Массовые доли периферической и ядерной (каркасной) частей молекулы (%), рассчитанных из ТГ согласно ГОСТ 29127-91*

Название образца		Δm_{nep}	$\Delta m_{яд}$
ГК, выделенные из удобрения «Гумовит»	в день получения	43.4	52.5
	по истечении срока годности (спустя 2 года хранения)	42.9	38.2
ГК, выделенные из удобрения «Лигновит»	в день получения	31.4	–
	по истечении срока годности (спустя 2 года хранения)	26.1	29.5

* – без учета массовой доли остатка термодеструкции.

Таблица 3. Основные оптические характеристики ГК, полученные из электронных спектров

Название образца		$E_{465\text{нм}, 1\text{см}}^{0.005\%}$	$Q = E_{465}/E_{650}$
ГК, выделенные из удобрения «Лигновит»	в день получения	0.0349	2.691
	по истечению срока годности (спустя 2 года хранения)	0.0369	3.512
ГК, выделенные из удобрения «Гумовит»	в день получения	0.0417	2.610
	по истечению срока годности (спустя 2 года хранения)	0.0201	4.116

Таблица 4. Спектральные коэффициенты гуминовых кислот по данным ИК-спектров

Образец	Соотношения оптических плотностей								
	OH ₃₄₀₀ / C=C ₁₆₁₀	C=O ₁₇₂₀ / C=C ₁₆₁₀	C-O ₁₂₇₀ / C=C ₁₆₁₀	CO ₁₀₇₀ / C=C ₁₆₁₀	C _{алк.2920} / C=C ₁₆₁₀	OH ₃₄₀₀ / C _{алк.2920}	C=O ₁₇₂₀ / C _{алк.2920}	C-O ₁₂₇₀ / C _{алк.2920}	CO ₁₀₇₀ / C _{алк.2920}
1	2.08	0.89	0.89	0.97	1.31	1.58	0.68	0.68	0.74
2	0.99	0.97	0.97	0.98	1.01	0.99	0.96	0.96	0.97
3	1.21	0.78	0.83	1.09	1.20	1.22	0.80	0.76	0.74
4	1.03	0.99	0.95	0.95	1.08	0.95	0.91	0.87	0.87

Обозначения: 1 – ГК, выделенные из жидкого гуминового удобрения «Гумовит» со сроком хранения более двух лет; 2 – ГК, выделенные жидкого гуминового удобрения «Гумовит» в день получения; 3 – ГК, выделенные из жидкого гуминового удобрения «Лигновит» со сроком хранения более двух лет; 4 – ГК, выделенные из жидкого гуминового удобрения «Лигновит» в день получения.

Для ГК в процессе хранения в водных растворах щелочей отмечен рост общего содержания ОН-групп относительно алифатической и ароматической частей молекулы полимера. На основании этого можно предположить, что протекает щелочной гидролиз всех типов эфирных связей.

Отмечено снижение количества карбоксильных и карбонильных групп (1720 см^{-1}), указывающее на частичное декарбоксилирование ГК в процессе хранения.

Отмечен незначительный рост числа фенольных и первичных гидроксильных групп относительно числа ароматических фрагментов. Гидролитическая деструкция обусловлена снижением числа углеводных фрагментов в периферической части ГК. На основании вышесказанного сделано заключение о щелочном гидролизе глюкозидной связи (с редуцирующим концом) в процессе хранения раствора ГК у ее олигосахаридных фрагментов молекулы.

Независимо от природы основания, в процессе хранения отмечено снижение общей доли ароматических фрагментов (каркасной части ГК) по отношению к ее алифатической части.

Уровень биологической активности удобрений оценен по результатам посева колоний макро- и микромицетов на фоне контроля (воды). Результаты влияния удобрения «Лигновит», выполненные в восьмикратной повторности на чашках Петри, представлены на рисунках 1–5.

В опыте отмечена наибольшая отзывчивость культуры макромицета *Schizophyllum commune* к действию гумата.

Наименьшая динамика роста под действием гумата отмечена у культуры микромицета *Paecilomyces variotii*.

Все исследуемые виды грибов положительным образом отзывались на присутствие в питательной среде ГК, что свидетельствует о сохранности (полной или частичной) биологической активности жидкого гуминового удобрения с истекшим сроком годности.

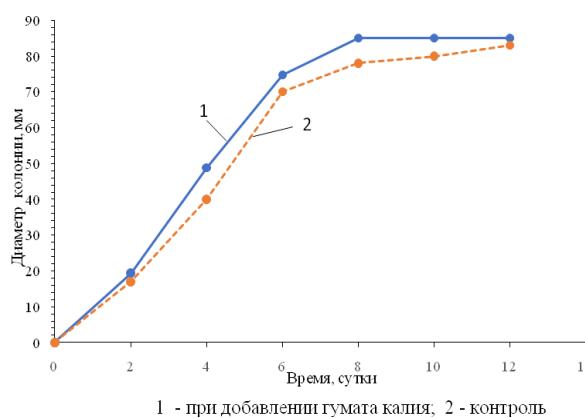


Рис. 1. Рост микромицета *Paecilomyces variotii* с добавлением гуминового удобрения и без него

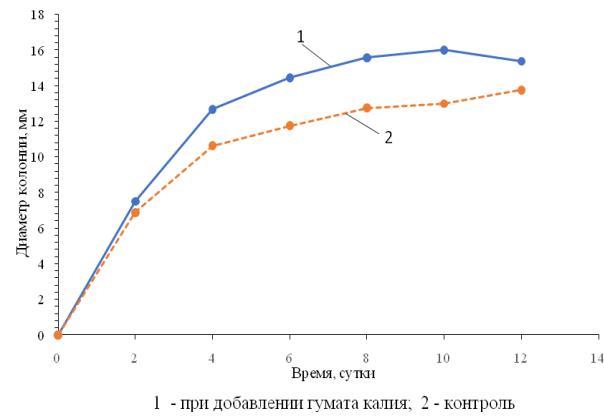


Рис. 2. Рост микромицета *Aspergillus terreus* с добавлением гуминового удобрения и без него

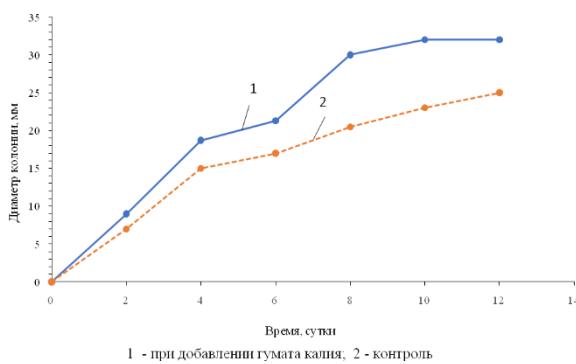


Рис. 3. Рост микромицета *Penicillium ochrochloron* с добавлением гуминового удобрения и без него

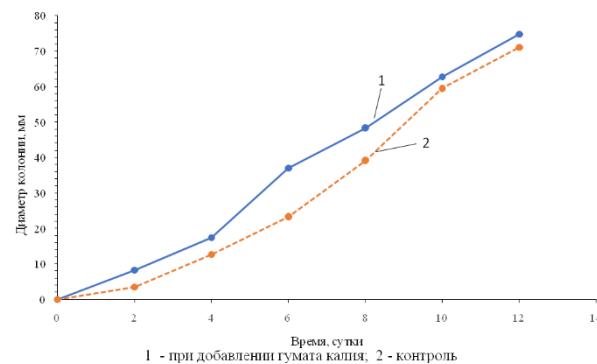


Рис. 4. Рост макромицета *Fomitopsis betulina* с добавлением гуминового удобрения и без него

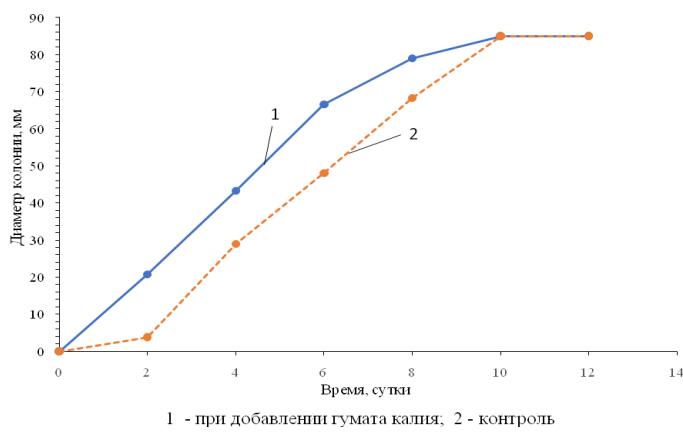


Рис. 5. Рост макромицета *Schizophyllum comtissime* с добавлением гуминового удобрения и без него

Выходы

1. В процессе длительного складского хранения ГК (в условиях положительных температур) в составе водно-щелочных растворов жидких гуминовых удобрений отмечено снижение молекулярной массы ГК, обусловленное гидролитической деструкцией ее периферической и каркасной частей. Деструктивные гидролитические процессы обусловлены длительным воздействием раствора щелочи, входящего в состав удобрения.
2. Методом ИК-спектроскопии показано, что гидролитическая деструкция обусловлена разрушением простых и сложных эфирных связей в структуре молекул гуминовых кислот.
3. На основании биотестирования ГК, на примере микро- и макромицетов установлено, что длительное хранение жидкого гуминового удобрения, превышающее срок его годности, не оказывает значимого негативного воздействия на уровень биологической активности в отношении данной группы биоиндикаторов.

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Сургутского государственного университета. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Безуглова О.С., Полиенко Е.А., Горовцов А.В. Гуминовые препараты, как стимуляторы роста растений и микроорганизмов (обзор) // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. №4(60). С. 11–14.
2. Горовая А.И., Орлов Д.С., Щербенко О.В. Гуминовые вещества. Строение, функции, механизм действия, протекторные свойства, экологическая роль. Киев, 1995. 303 с.
3. Аллахвердиев С.Р., Ерошенко В.И. Современные технологии в органическом земледелии // Международный журнал фундаментальных и прикладных исследований. 2017. №1-1. С. 76–79.
4. Ермаков Е.И., Попов А.И. Развитие представлений о влиянии гуминовых веществ на метаболизм и продуктивность растений // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2003. №2. С. 16–20.
5. Грехова И.В. Гуминовый препарат из низинного торфа // Теоретическая и прикладная экология. 2015. №1. С. 85–88. DOI: 10.25750/1995-4301-2015-1-087-090.
6. Якименко О.С., Терехова В.А., Пукальчик М.А., Горленко М.В., Попов А.И. Сравнение двух интегральных биотических индексов при оценке эффективности воздействия гуминовых препаратов в модельном эксперименте // Почвоведение. 2019. №7. С. 781–792. DOI: 10.1134/S0032180X19070153.
7. Бутовец Е.С., Лукьянчук Л.М., Зиангирова Л.М. Испытание гуминовых препаратов на сое в условиях Приморского края // Вестник КрасГАУ. 2020. №10. С. 42–50. DOI: 10.36718/1819-4036-2020-10-42-50.

8. Проценко Е.А., Виноградова В.С., Козина А.А. Агроэкологические аспекты приёмов применения гуминовых фитобиокомплексов при выращивании картофеля // АгроЭкоИнфо. 2020. №1(39). С. 6.
9. Виноградова В.С., Смирнова Ю.В. Экологические аспекты совместного применения органических удобрений и гуминовых препаратов // Агрохимический вестник. 2004. №3. С. 16–17.
10. Дудкин Д.В., Федяева И.М. Основы механохимической технологии получения гуматов из торфа // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы VII Всероссийской конференции с международным участием. Барнаул, 2017. С. 330–332.
11. Дудкин Д.В., Федяева И.М. Комплексная химическая переработка торфа и лесотехнических отходов // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы VI Всероссийской конференции с международным участием. Барнаул, 2014. С. 359–361.
12. Дудкин Д.В., Федяева И.М. Механохимическая технология переработки коры сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris*) в жидкое гуминовое удобрение // АгроЭкоИнфо. 2018. №2. URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/2/st_255.doc.
13. Патент №2581531 (РФ). Способ гумификации растительного сырья / Д.В. Дудкин, И.М. Федяева. – 20.04.2016.
14. Патент №2442763 (РФ). Способ гумификации растительных материалов / Д.В. Дудкин, Д.А. Евстратова. – 20.02.2012.
15. Патент №2429214 (РФ). Способ получения гуминовых кислот и гуматов из торфа / Д.В. Дудкин, А.С. Толстяк, Г.Ф. Фахретдинова. – 20.09.2011.
16. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М., 1981. 272 с.
17. Михайлов Д.И., Звягина Е.А., Мантрова М.В., Дудкин Д.В., Федяева И.М. Влияние гумата аммония на рост грибов // Актуальные вопросы органической химии и биотехнологии: материалы очных докладов Международной научной конференции. Екатеринбург, 2020. С. 615–616.
18. Дудкин Д.В., Федяева И.М. Малоотходная технология получения растворов гуминовых веществ из торфа различного ботанического состава и степени разложения // Химия растительного сырья. 2018. №2. С. 175–182. DOI: 10.14258/jcprm.2018023356.
19. Дудкин Д.В., Федяева И.М. Основы малоотходной технологии получения сложных и комплексных удобрений из растительного сырья // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием. Барнаул, 2020. С. 180–181.
20. Дудкин Д.В., Змановская А.С. О формах органически связанных азота продуктов искусственной гумификации лигноуглеводных материалов // Химия растительного сырья. 2013. №4. С. 207–211. DOI: 10.14258/jcprm.1304207.
21. Дудкин Д.В., Федяева И.М., Змановская А.С. Особенности молекулярного строения гуминовых кислот, полученных в условиях солации растительного сырья в водно-щелочных средах // Химия растительного сырья. 2015. №1. С. 147–154. DOI: 10.14258/jcprm.201501384.
22. Федорова Т.Е., Дудкин Д.В., Рохин А.В., Першина Л.А., Бабкин В.А. Анализ химического состава гуминоподобных веществ лузги подсолнечника, подвергнутой окислительному аммонолизу при механохимическом воздействии, методом количественной спектроскопии ЯМР ^1H и ^{13}C // Химия растительного сырья. 2003. №4. С. 25–29.
23. Сартаков М.П., Чумак В.А. Инфракрасные спектры поглощения гуминовых кислот аллювиальных почв Обь-Иртышской поймы // Вестник КрасГАУ. 2013. №8. С. 53–56.
24. Socrates G. Infrared and Raman characteristic group frequencies. Table and charts. John Wiley & Sons, 2001. 347 p.
25. Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. Определение строения органических соединений. М., 2006. 438 с.

Поступила в редакцию 4 марта 2023 г.

После переработки 8 февраля 2024 г.

Принята к публикации 9 февраля 2024 г.

Dudkin D.V.*¹, Zhuravleva L.A., Shishadsky B.A., Tanykova N.G. TRANSFORMATION OF HUMIC ACIDS OF LIQUID HUMIC FERTILIZERS DURING THEIR STORAGE

¹Surgut State University, Lenina av., 1, Surgut, 628406, Russia, dvdudkin@rambler.ru

The subject of the study is liquid humic fertilizers obtained by the original mechanochemical technology based on peat and vegetable raw materials. The aim of the study is to evaluate the effect of prolonged exposure to aqueous alkali solutions during storage on the chemical composition of humic substances that are part of liquid humic fertilizers. The change in the chemical composition of the active substances of fertilizers "Lignovit" and "Gumovit" (LLC Chemtechnology, Khanty-Mansiysk) after the expiration of the shelf life was studied. A decrease in the molecular weight of humic acids (HA) in the composition of liquid humic fertilizers was found due to the hydrolytic destruction of their peripheral and skeleton parts. Destructive hydrolytic processes are caused by prolonged exposure to an aqueous-alkaline solution, which is included in its composition. It has been shown by IR spectroscopy that hydrolytic destruction is caused by the destruction of simple and complex ether bonds in the structure of humic acid molecules. A decrease in the number of carboxyl and carbonyl groups was noted, which indicates partial decarboxylation of HA during storage. Using the example of the growth of micro- and macromycetes, it was found that long-term storage of liquid humic fertilizer does not have a negative impact on the level of its biological activity in relation to this group of organisms.

Keywords: humic acids, humic fertilizers, peat, storage, biological activity, destruction, peripheral part.

For citing: Dudkin D.V., Zhuravleva L.A., Shishadsky B.A., Tanykova N.G. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 3, pp. 320–327. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240312635.

References

- Bezuglova O.S., Poliienko Ye.A., Gorovtsov A.V. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2016, no. 4(60), pp. 11–14. (in Russ.).
- Gorovaya A.I., Orlov D.S., Shcherbenko O.V. *Guminovyye veshchestva. Stroyeniye, funktsii, mehanizm deystviya, protektornyye svyostva, ekologicheskaya rol'*. [Humic substances. Structure, functions, mechanism of action, protective properties, ecological role]. Kyiv, 1995, 303 p. (in Russ.).
- Allakhverdiyev S.R., Yeroshenko V.I. *Mezhdunarodnyy zhurnal fundamental'nykh i prikladnykh issledovanii*, 2017, no. 1-1, pp. 76–79. (in Russ.).
- Yermakov Ye.I., Popov A.I. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*, 2003, no. 2, pp. 16–20. (in Russ.).
- Grekhova I.V. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2015, no. 1, pp. 85–88. DOI: 10.25750/1995-4301-2015-1-087-090. (in Russ.).
- Yakimenko O.S., Terekhova V.A., Pukal'chik M.A., Gorlenko M.V., Popov A.I. *Pochvovedeniye*, 2019, no. 7, pp. 781–792. DOI: 10.1134/S0032180X19070153. (in Russ.).
- Butovets Ye.S., Luk'yanchuk L.M., Ziangirova L.M. *Vestnik KrasGAU*, 2020, no. 10, pp. 42–50. DOI: 10.36718/1819-4036-2020-10-42-50. (in Russ.).
- Protsenko Ye.A., Vinogradova V.S., Kozina A.A. *AgroEkoInfo*, 2020, no. 1(39), p. 6. (in Russ.).
- Vinogradova V.S., Smirnova Yu.V. *Agrokhimicheskiy vestnik*, 2004, no. 3, pp. 16–17. (in Russ.).
- Dudkin D.V., Fedyayeva I.M. *Novyye dostizheniya v khimii i khimicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya: materialy VII Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. [New achievements in chemistry and chemical technology of plant raw materials: Proceedings of the VII All-Russian Conference with international participation]. Barnaul, 2017, pp. 330–332. (in Russ.).
- Dudkin D.V., Fedyayeva I.M. *Novyye dostizheniya v khimii i khimicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya: materialy VI Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. [New achievements in chemistry and chemical technology of plant raw materials: Proceedings of the VI All-Russian Conference with international participation]. Barnaul, 2014, pp. 359–361. (in Russ.).
- Dudkin D.V., Fedyayeva I.M. *AgroEkoInfo*, 2018, no. 2. URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/2/st_255.doc. (in Russ.).
- Patent 2581531 (RU). 20.04.2016. (in Russ.).
- Patent 2442763 (RU). 20.02.2012. (in Russ.).
- Patent 2429214 (RU). 20.09.2011. (in Russ.).
- Orlov D.S., Grishina L.A. *Praktikum po khimii gumusa*. [Practical training in humus chemistry]. Moscow, 1981, 272 p. (in Russ.).
- Mikhaylov D.I., Zvyagina Ye.A., Mantrova M.V., Dudkin D.V., Fedyayeva I.M. *Aktual'nyye voprosy organicheskoy khimii i biotekhnologii. Materialy ochnykh dokladov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. [Current issues in organic chemistry and biotechnology. Materials of face-to-face reports of the International scientific conference]. Ekaterinburg, 2020, pp. 615–616. (in Russ.).
- Dudkin D.V., Fedyayeva I.M. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2018, no. 2, pp. 175–182. DOI: 10.14258/jcprm.2018023356. (in Russ.).

* Corresponding author.

19. Dudkin D.V., Fedyayeva I.M. *Novyye dostizheniya v khimii i khimicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya: materialy VIII Vserossiyskoy konferentsii s mezhunarodnym uchastiyem*. [New achievements in chemistry and chemical technology of plant raw materials: Proceedings of the VIII All-Russian Conference with international participation]. Barnaul, 2020, pp. 180–181. (in Russ.).
20. Dudkin D.V., Zmanovskaya A.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2013, no. 4, pp. 207–211. DOI: 10.14258/jcprm.1304207. (in Russ.).
21. Dudkin D.V., Fedyayeva I.M., Zmanovskaya A.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2015, no. 1, pp. 147–154. DOI: 10.14258/jcprm.201501384. (in Russ.).
22. Fedorova T.Ye., Dudkin D.V., Rokhin A.V., Pershina L.A., Babkin V.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2003, no. 4, pp. 25–29. (in Russ.).
23. Sartakov M.P., Chumak V.A. *Vestnik KrasGAU*, 2013, no. 8, pp. 53–56. (in Russ.).
24. Socrates G. *Infrared and Raman characteristic group frequencies. Table and charts*. John Wiley & Sons, 2001, 347 p.
25. Prech E., Byul'mann F., Affol'ter K. *Opredeleniye stroyeniya organicheskikh soyedineniy*. [Determination of the structure of organic compounds]. Moscow, 2006, 438 p. (in Russ.).

Received March 4, 2023

Revised February 8, 2024

Accepted February 9, 2024

Сведения об авторах

Дудкин Денис Владимирович – доктор технических наук, кандидат химических наук, доцент кафедры химии, dvdudkin@rambler.ru

Журавлева Людмила Анатольевна – кандидат химических наук, доцент кафедры химии, zhlala@yandex.ru

Шишиадский Борис Романович – магистрант, red_1_bull@mail.ru

Таныкова Наталья Геннадьевна – аспирант, Tanykova_ng@surgu.ru

Information about authors

Dudkin Denis Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry, dvdudkin@rambler.ru

Zhuravleva Lyudmila Anatolyevna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry, zhlala@yandex.ru

Shishadsky Boris Romanovich – Master's student, red_1_bull@mail.ru

Tanykova Natalya Gennadyevna – Postgraduate Student, Tanykova_ng@surgu.ru