

УДК 546.11.027*3:547.992:631.81

ТРИТИЕВАЯ МЕТКА – УНИКАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ В ЖИВЫХ СИСТЕМАХ

Г.А. Бадун, Н.А. Куликова¹, М.Г. Чернышева, З.А. Тясто, В.И. Коробков, В.М. Федосеев, Е.А. Цветкова², А.И. Константинов, А.В. Кудрявцев, И.В. Перминова

(кафедра радиохимии, кафедра органической химии; e-mail: badunga@yandex.ru)

Методом термической активации трития получен ряд меченых гуминовых веществ. Высокая удельная радиоактивность и радиохимическая чистота позволили провести прямое определение гидрофобности гуминовых веществ, их поверхностной активности, а также изучить поведение гуминовых веществ в бактериях и растениях.

Ключевые слова: тритий, меченые соединения, гуминовые вещества.

Меченные тритием соединения нашли широкое применение в решении многих научных задач, так как тритий обладает уникальными ядерно-физическими свойствами (максимальная энергия бета-излучения 18,6 кэВ, период полураспада 12,3 года). Тритий можно ввести практически в любую органическую молекулу, работа с мечеными тритием веществами не требует чрезвычайных мер радиационной защиты, а удельная радиоактивность соединения, содержащего один атом трития на молекулу, составляет 1,07 ТБк/моль.

Современные исследования сложных природных образований выдвигают особые требования к меченым веществам. Такие образования содержат сложные смеси макромолекул переменного состава и нерегулярного строения, и для их описания используют интегральные характеристики, поэтому для изучения подобных объектов с помощью радиоактивной метки требуется неизбирательное введение трития и его равномерное распределение по компонентам объектов. При этом процедура введения метки должна быть универсальной, а меченый препарат должен полностью сохранять свойства исходного.

Примером сложных природных образований являются гуминовые вещества (ГВ). Отличительной особенностью ГВ является стохастический характер, обусловленный особенностями их образования в результате отбора биотермодинамически устойчивых структур. К фундаментальным свойствам ГВ относятся нестехиометричность состава, нерегулярность

строения, гетерогенность структурных элементов и полидисперсность. По своей химической природе ГВ представляют собой нерегулярные сополимеры ароматических оксиполикарбоновых кислот с включениями азотсодержащих и углеводных фрагментов. Такое строение (наличие каркасной части, т.е. ароматического углеродного скелета, замещенного алкильными и функциональными группами, среди которых преобладают карбоксильные, гидроксильные и метоксильные, и периферической части, обогащенной полисахаридными и полипептидными фрагментами) является общим для ГВ любого происхождения. Общепринятая классификация ГВ основана на процедуре их фракционирования. ГВ подразделяют на гумин (нерастворим во всем диапазоне pH), гуминовые кислоты (ГК, нерастворимы при pH < 2) и фульвокислоты (ФК, растворимы во всем диапазоне pH). Последние два класса объединяют под общим названием гумусовые кислоты. Эта схема дополняется иногда также выделением гиматомелановых кислот (ГМК), отделяемых воздействием на сырой осадок ГК этанолом.

В настоящее время во всем мире наблюдается повышенный интерес к ГВ, совершенствуются технологии производства, расширяется сырьевая база, в которую вовлекаются все новые виды углей, торфов, сланцев, пелоидов. Наибольшее распространение гуминовые препараты получили в растениеводстве как безопасная с точки зрения окружающей среды альтернатива удобрениям и в ряде случаев пестицидам. Многочисленные исследования показали, что гумино-

¹Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт биохимии им. А.Н. Баха РАН, ²Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН.

вые соединения оказывают стимулирующее действие на рост и развитие растений и повышают их устойчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды. При систематическом использовании препаратов улучшается почвенная структура, буферные и ионообменные свойства почвы, активизируется деятельность почвенных микроорганизмов, минеральные элементы переводятся в доступную для растений форму. Особого внимания заслуживают адаптогенные свойства ГВ, обусловленные их способностью связывать радионуклиды, ионы тяжелых металлов и ксенобиотики. Гуминовые препараты повышают способность растений противостоять болезням, засухе, переувлажнению и другим неблагоприятным условиям окружающей среды.

Гуминовые препараты привлекают внимание специалистов и других областей, таких как медицина, животноводство, рекультивация загрязненных сред и др. Применение ГВ ограничивается в настоящее время недостатком исследований, посвященных проблемам количественного описания структуры и свойств ГВ и механизмам их действия. Один из наиболее перспективных путей решения этой проблемы – получение радиоактивно меченых ГВ.

В последние годы на кафедре радиохимии химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова метод термической активации трития был адаптирован для введения тритиевой метки в ГВ. Для регистрации излучения трития использовали жидкостную сцинтилляционную спектрометрию с применением метода сцинтиллирующей фазы [1] и автордиографии [2], что позволило изучить гидрофобность и поверхностно-активные свойства ГВ, а также их взаимодействие с бактериями и растениями.

Получение меченных тритием гуминовых веществ

Меченные тритием ГВ ($[^3\text{H}] \text{ГВ}$) получали методом термической активации трития. Этот метод позволяет проводить прямое введение изотопа трития в сложные смеси органических соединений и в наибольшей степени отвечает таким требованиям получения меченых соединений, как неизбирательное введение трития и его равномерное распределение по компонентам объекта.

Мы показали, что оптимальные условия для введения тритиевой метки в ГВ методом термической активации следующие: масса мишени 0,3–0,5 мг, температура атомизатора 1900–1950 К, давление газа в системе 0,5 Па и время воздействия 10 с [3]. Во вре-

мя реакции с атомами трития мишень охлаждали жидким азотом. Очистку получаемого меченого препарата проводили с помощью равновесного диализа, направленного на удаление трития из лабильных положений (OH^- , COOH^- и NH_n).

С увеличением массы мишени снижалась удельная радиоактивность. Это связано с тем, что в реакцию с атомами трития вступают только молекулы, находящиеся на поверхности мишени, поскольку при лиофилизации ГВ они образуют плотную мишень с неразвитой поверхностью, малопроницаемую для атомов трития.

Увеличение времени реакции также приводит к снижению выхода $[^3\text{H}] \text{ГВ}$ из-за деструкции поверхностного слоя мишени под действием горячих атомов. Молярная радиоактивность $[^3\text{H}] \text{ГВ}$ увеличивается с ростом температуры атомизатора и достигает максимума при 1900–1950 К. Необходимо отметить, что дальнейшее увеличение температуры атомизатора приводит к увеличению образования модифицированных меченых молекул, следствием чего явилось снижение выхода основного продукта. Аналогичный вид температурной зависимости наблюдается для индивидуальных веществ – компонентов ГВ [4].

Идентичность меченных тритием препаратов исходным проверяли методом эксклюзионной гель-хроматографии с одновременной детекцией по радиоактивности и УФ-поглощению при 254 нм. Как видно из рис. 1, гель-хроматограммы $[^3\text{H}] \text{ГВ}$ и ГВ, использованных для получения меченого препарата, совпадают между собой. Это свидетельствует о том, что введение метки не приводит к полной или частичной деструкции ГВ или их значимому изменению. С другой стороны, нами была также продемонстрирована идентичность гель-хроматограмм меченных тритием ГВ при детекции по радиоактивности и УФ-поглощению (рис. 1). На основании этого нами был сделан вывод о равномерном введении метки во все структурные фрагменты.

Удельная радиоактивность получаемых препаратов $[^3\text{H}] \text{ГВ}$ изменяется в диапазоне от 0,14 до 0,63 ТБк/г, что значительно превышает значения для получаемых другими способами $[^3\text{H}] \text{ГВ}$ (0,01–0,07 ТБк/г) [5, 6]. Следует отметить также, что достоинством разработанного метода является возможность получения препаратов $[^3\text{H}] \text{ГВ}$, идентичных исходным ГВ, тогда как при использовании других методов введения радиоактивной метки в ГВ происходит модификация последних [6–9]. Например, при тритировании ФК с помощью $[^3\text{H}]\text{NaBH}_4$ имела место модификация ис-

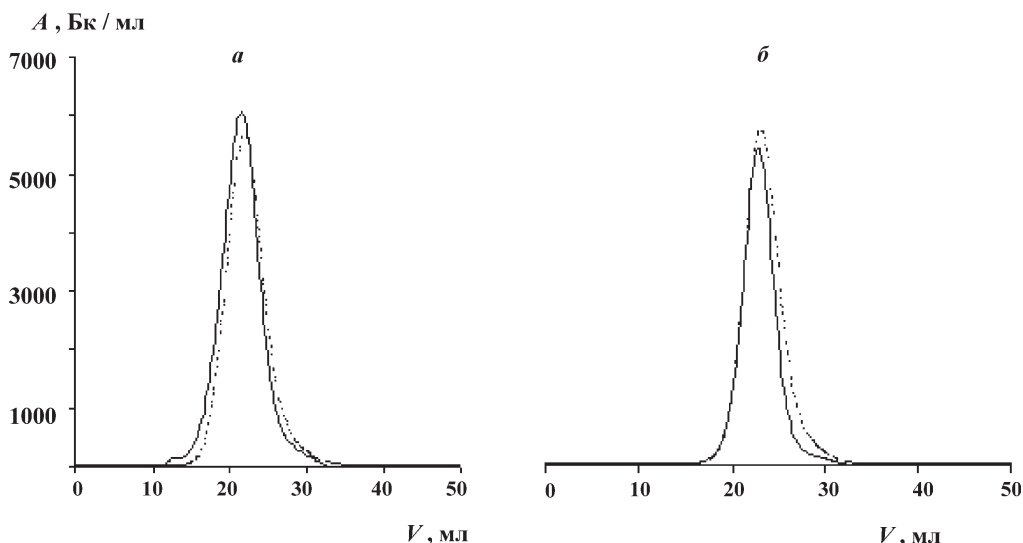


Рис. 1. Профили выхода ГВ (на примере ГК торфа): *а* - меченого препарата по УФ-поглощению (пунктир) и по радиоактивности (сплошная линия); *б* - исходного (пунктир) и меченого (сплошная линия) препаратов по УФ-поглощению

ходного вещества – восстановление карбониллов в составе кетонов и хинонов [6].

Проведенный корреляционный анализ между свойствами препаратов ГВ и удельной радиоактивностью получаемых [^3H] ГВ показал отсутствие взаимосвязи между этими параметрами. Это свидетельствует о неизбирательном введении трития и универсальности предложенного подхода получения меченных тритием ГВ.

Использование тритиевой метки для изучения свойств гуминовых веществ

Важнейшими свойствами, во многом определяющими биологическую активность органических соединений, являются гидрофобность и поверхностная активность, так как именно от этих параметров во многом зависит способность веществ взаимодействовать с биологическими мембранами. Однако до настоящего времени прямое определение указанных свойств ГВ было затруднено в связи с проблемами их аналитического детектирования. Благодаря возможности определения низких концентраций ГВ в присутствии других органических соединений, использование [^3H] ГВ позволило впервые провести количественную оценку гидрофобности и поверхностной активности ГВ. Для определения указанных свойств ГВ использовали жидкостную сцинтилляционную спектрометрию трития в варианте сцинтиллирующей фазы [1].

С помощью меченных тритием ГВ и метода сцинтиллирующей фазы были определены коэффициенты

распределения ГВ между водой и толуолом, а также найдена величина адсорбции на границе раздела фаз двух жидкостей. Зависимость равновесной концентрации ГВ в органической фазе от их концентрации в водной фазе имела линейный характер, что позволило рассчитать коэффициенты распределения исследуемых веществ между водой и толуолом (K_{tw}) [10]. Величины K_{tw} лежали в диапазоне от $0,3 \times 10^{-3}$ (ФК почвы) до $3,7 \times 10^{-3}$ (ГК угля). Так как для характеристики гидрофобности вещества принято использовать коэффициент распределения между октанолом и водой (K_{ow}), то с помощью меченных тритием ГВ были определены соответствующие коэффициенты. Найдена хорошая корреляция между этими коэффициентами:

$$\lg K_{\text{tw}} = 0,96 \times \lg K_{\text{ow}} - 0,66 \quad (r^2 = 0,96).$$

Таким образом, с помощью метода сцинтиллирующей фазы и [^3H] ГВ можно получать количественные характеристики гидрофобности ГВ. Мы показали, что гидрофобность ГВ увеличивается в следующем порядке:

ФК почв < ГК почв < ГК торфа \approx ФК торфа < ГК угля.

С помощью метода сцинтиллирующей фазы были получены изотермы адсорбции ГВ на границе раздела толуол–вода. Удельная радиоактивность [^3H] ГВ оказалась достаточной для достоверного определения количества ГВ на границе раздела фаз в диапазоне концентрации в водной фазе 0,1–100 мг/л. В большинстве случаев изотермы адсорбции принадлежали Лэнгмю-

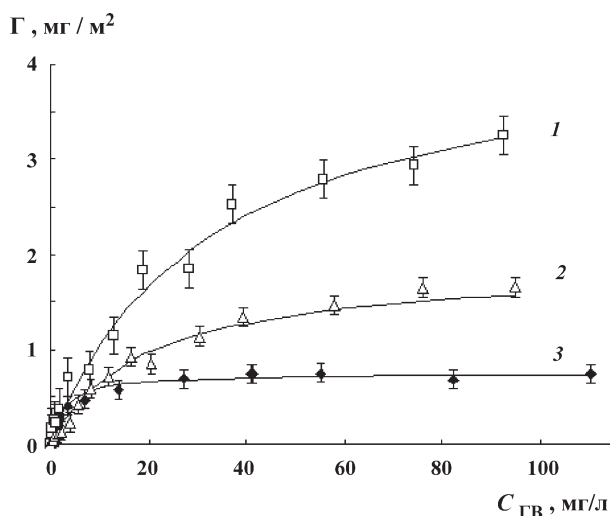


Рис. 2. Изотермы адсорбции ГВ на межфазной границе вода–толуол: 1 – ГК торфа, 2 – ФК торфа, 3 – ГК угля

ровскому типу (рис. 2). При увеличении концентрации препарата в водной фазе в диапазоне от 0,1 до 5,0 мг/л наблюдалось быстрое увеличение количества адсорбированных меченых молекул ГВ на границе раздела толуол–вода. При концентрации от 20 до 60 мг/л происходило насыщение адсорбционного слоя, и при дальнейшем увеличении концентрации вещества в водной фазе количество молекул ГВ на границе раздела практически не менялось. Величина предельной адсорбции $\Gamma_{\text{макс}}$ лежала в пределах от 0,08 мг/м² (ФК почвы) до 2,8 мг/м² (ГК торфа). На основании проделанных экспериментов был получен ряд изменения поверхностной активности исследованных препаратов ГВ, который выглядит следующим образом:

$$\text{ФК почв} < \text{ГК почв} < \text{ГК угля} < \text{ФК торфа} < \text{ГК торфа.}$$

При сопоставлении величин предельной адсорбции ГВ со значениями их средневесовой молекулярной массы M_w было установлено, что при увеличении M_w предельная адсорбция $\Gamma_{\text{макс}}$ также возрастает [11]. Анализ полученных данных показал, что дополнительным фактором, влияющим на адсорбцию ГВ на межфазной поверхности, является такая характеристика состава ГВ, как атомное отношение Н/С. Оказалось, что величина максимальной адсорбции $\Gamma_{\text{макс}}$ линейно связана с произведением $M_w \times (\text{Н/С})$, что наглядно представлено на рис. 3. Следует отметить, что исследованные препараты ГВ образуют две хорошо разделенные группы. Так, ГВ торфа и угля ложатся на одну корреляционную зависимость, а препараты ГВ почв – на другую. Такое различие в адсорбционных свойствах может быть связано с тем,

что ГК торфа и угля обогащены предельными жирными кислотами и их производными, которые способны образовывать ассоциаты с ароматическими углеводородами [12].

Использование тритиевой метки для изучения взаимодействия гуминовых веществ с биологическими объектами

Наличие в ГВ как гидрофобных, так и гидрофильных фрагментов обуславливает их поверхностно-активные свойства и мембранотропную активность [13–15]. Способность ГВ вступать во взаимодействие с биологическими мембранами установлена для фитопланктона [15], жаберных клеток рыб [16], бактерий [17, 18], грибов [19] и растений [20]. Разнообразие использованных авторами объектов позволяет сделать вывод, что сорбция ГВ на биологических мембранах – широко распространенный процесс. Тем не менее существуют только единичные работы, посвященные его количественному описанию, а работы, посвященные оценке поступления ГВ в клетки, практически отсутствуют [21]. В данной работе меченые тритием ГВ использовали для изучения и количественного описания их взаимодействия с бактериями и растениями.

При изучении взаимодействия ГВ с бактериями в качестве модели использовали грамм-отрицательные бактерии кишечной палочки *E. coli* XL1 с тетрациклиновой устойчивостью [22]. Полученные результаты позволили показать линейную зависимость поглощения ГВ бактериальными клетками от концентрации ГВ (рис. 4) и установить, что факторы бионакопления ГВ бактериями кишечной палочки изменяются в ди-

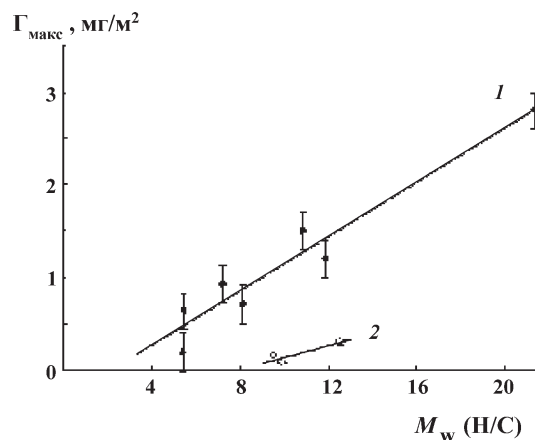


Рис. 3. Зависимость величин максимальной адсорбции ГВ на границе раздела толуол–вода ($\Gamma_{\text{макс}}$) от характеристик ГВ: 1 – ГВ торфа и угля, 2 – ГВ почв

апазоне от 0,9 до 13,1 л/кг. По способности взаимодействовать с живыми клетками исследованные препараты ГВ образуют следующий ряд:

$$\text{ФК почв} < \text{ФК торфа} < \text{ГК почв} < \text{ГК угля} \approx \text{ГК торфа}$$

Применение [^3H] ГВ впервые позволило получить экспериментальные доказательства поступления ГВ во внутриклеточное пространство. Количество ГВ, проникнувших через мембрану, лежит в диапазоне 23–167 мг/кг клеток, что составляет 20 и 100% от общего количества поглощенных ГВ в случае ГК и ФК соответственно. Сопоставление свойств ГВ с параметрами их взаимодействия показало наличие значимой корреляционной взаимосвязи между количеством ГВ, поступивших в клетку, и поверхностной активностью ГВ:

$$\text{ГВ}_{\text{пост}} = 49 \times \text{Г}_{\text{макс}} + 28 \quad (r^2 = 0,95).$$

Таким образом, полученные результаты впервые показали ведущую роль поверхностной активности ГВ в определении их взаимодействия с живыми клетками. Для проведения экспериментов с растениями в качестве тест-объектов использовали проростки мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L. [23]. После экспонирования растений [^3H] ГВ растительные образцы подвергали автордиографии. Количественный анализ автордиограмм проводили с использованием подхода, рекомендованного в работе [24].

На основании проведенных исследований были получены количественные характеристики поглощения ГВ растениями и установлено, что максимальная скорость поглощения ГВ изменяется в диапазоне от 6 до 54 мг/кг за 1 ч. Результаты автордиографии (рис. 5) показали неравномерность распределения ГВ в растениях: ГВ преимущественно находились в кор-

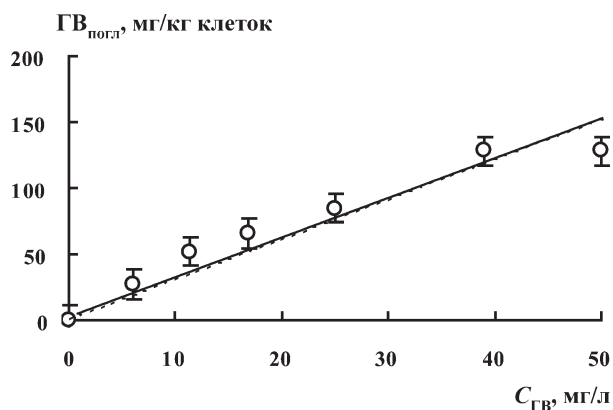


Рис. 4. Поглощение [^3H]-ГВ клетками бактерий *E. coli* (на примере ГК угля)

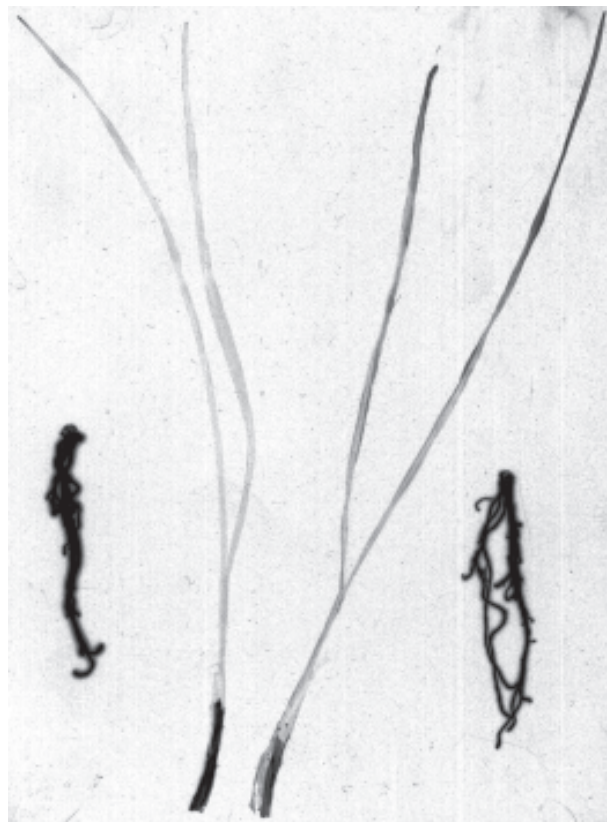


Рис. 5. Значения оптической плотности D разных частей корней и побегов растений пшеницы после взаимодействия с ГК угля [^3H]-СНА-Ров и ФК вод [^3H]-АНА-SR. Экспозиция: корни 5 сут. 10 мин, побеги 1 сут. 20 ч 30 мин

нях, тогда как в побегах поступало значительно меньшее их количество. Считая, что оптическая плотность D на автордиограммах прямо пропорциональна концентрации метки и времени экспозиции, было рассчитано отношение концентраций ГВ в корнях к концентрации ГВ в побегах как отношение значений оптической плотности в этих частях растений, нормированное на время экспонирования. В исследованных условиях указанное отношение составило $40,7 \pm 0,3$ для ГК угля и 10 ± 2 для ФК вод, т.е. концентрация ГК и ФК в побегах в среднем превышала таковую в корнях в 40 и в 10 раз соответственно. С учетом массы корней и побегов растений было рассчитано, что в корнях аккумулируется в 22 раза больше ГК угля, чем в побегах; для ФК аналогичный показатель составил 5. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что ФК способны поступать из корней в надземные органы растений в большей степени, чем ГК.

На основании полученных автордиограмм установлено, что распределение ГВ по корням и побегам также неоднородно: в апикальных частях как корней,

так и побегов наблюдается локальное увеличение концентрации ГВ. Обработка автордиограмм показала, что оптическая плотность в кончиках корней превышает таковую в среднем по всему корню в 2 раза; аналогичное отношение для побегов составило 8 (таблица).

Таким образом, мы разработали метод прямого введения изотопа трития в ГВ различного происхождения с помощью термической активации. Этот метод позволяет получать меченные тритием ГВ, отвечающие основным предъявляемым требованиям, а именно: неизбирательное введение изотопа; равномерное распределение изотопа по разным фракциям ве-

щества; универсальность процедуры и сохранение свойств исходного препарата. Продемонстрированные в работе преимущества предложенных радиохимических подходов к получению меченных тритием ГВ открывают широкие перспективы для изучения свойств и поведения в биологических системах не только ГВ, но и других природных полимеров сложного строения и переменного состава.

Авторы выражают благодарность канд. хим. наук В.Ю. Поздняковой, Е.Ю. Беляевой (химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова) и докт. биол. наук О.В. Королевой (институт биохимии им. А.Н. Баха РАН) за помощь в проведении ряда экспериментов.

Оптические плотности D различных частей корней и побегов растений пшеницы после взаимодействия с ГК угля и ФК вод. Экспозиция: корни 5 сут 10 мин, побеги 1 сут 20 ч 30 мин

Шифр ГВ	Корни			Побеги		
	корни	апексы	$D_{\text{апексы}}/D_{\text{корни}}$	побеги	апексы	$D_{\text{апексы}}/D_{\text{побеги}}$
ГК угля	0,38±0,02	1,06±0,03	2,8	0,02±0,01	0,14±0,01	9,7
ФК вод	0,43±0,02	0,52±0,02	1,2	0,05±0,01	0,33±0,01	7,0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадун Г.А., Чернышева М.Г., Позднякова В.Ю., Федосеев В.М. // Радиохимия. 2005. **47**. С. 536.
2. Бабикова Ю.Ф., Гусаков А.А., Минаев В.М., Рябова Г.Г. Аналитическая автордиография. М., 1985.
3. Бадун Г.А., Позднякова В.Ю., Чернышева М.Г., Куликова Н.А., Перминова И.В., Шмит-Копплин Ф. Пат. на изобретение № 2295510. Приоритет изобретения 19.12.2005.
4. Чернышева М.Г., Бадун Г.А., Тясто З.А., Позднякова В.Ю., Федосеев В.М., Ксенофонтов А.Л. // Радиохимия. 2007. **49**. С. 165.
5. Wang D., Guan S., Xu X., Yang D., Zhu H., Pang X., Yi M. // Zhiwu Shenglixue Tongxun. 1984. **6**. P. 42.
6. Tinnacher R.M., Honeyman B.D. // Environ. Sci. Technol. 2007. **41**. P. 67.
7. Bubner M., Pompe S., Meyer M., Heise K.H., Nitsche H. // Annual report 1998 of Institute of Radiochemistry – Forschungszentrum Rossendorf. Jan 1999 – FZR-247.
8. Lippold H., Muller N., Kupsch H. // Appl. Geochem. 2005. **20**. P. 1209.
9. Lippold H., Robler D., Kupsch H. // Scientific report FZKA 6999. **1**. 2004. P. 177.
10. Pozdnyakova V.Yu., Badun G.A., Chernysheva M.G., Tyasto Z.A., Fedoseev V.M., Perminova I.V. / Proc. 13th Meeting IHSS, Karlsruhe July 30 to August 4. 2006. P. 945.
11. Chernysheva M.G., Badun G.A., Perminova I.V., Korobkov V.I., Tyasto Z.A., Belyaeva E.Yu., Kudryavtsev A.V., Tsvetkova E.A., Kulikova N.A. / Proc. 14th Int Meeting IHSS. Moscow – Saint Petersburg, Russia. September 14-19, 2008. **2**. P. 509.
12. Badun G.A., Soboleva O.A., Chernysheva M.G. // Mend. Comm. 2007. **17**. P. 357.
13. Samson G., Visser S.A. // Soil Biol. Biochem. 1989. **21**. P. 343.
14. Ermakov E.I., Khitorova I.N., Skobeleva O.V. // Rus. J. Plant Physiol. 2000. **47**. P. 518.
15. Vigneault B., Percot A., Lafleur M., Campbell P.G.C. // Environ. Sci. Technol. 2000. **34**. P. 3907.
16. Campbell P.G., Twiss M.R., Wilkinson K.J. // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1997. **54**. P. 25.
17. Frost P.C., Maurice P.A., Fein J.B. // Chem. Geol. 2003. **200**. P. 217.
18. Maurice P.A., Manecki M., Fein J.B., Schaefer J. // Geomicrobiol. J. 2004. **21**. P. 69.
19. Zhou J.L., Banks C.J. // Chemosphere. 1993. **27**. P. 607.
20. Nardi S., Pizzeghello D., Muscolo A., Vianello A. // Soil Biol. Biochem. 2002. **34**. P. 1527.
21. Doblin M., Legrand C., Carlsson P., Hummert C., Graneli E., Hallegraef G. // Abst. of the 9th conference on Harmful Algal Blooms – Tasmania. 2000.
22. Kulikova N.A., Badun G.A., Perminova I.V., Pozdnyakova V.Yu., Belyaeva E.Yu., Kudryavtsev A.V. / Proc. XII Int. Meeting of IHSS Humic Substances and Soil and Water Environment. Sao-Pedro, Brazil, July 25-30. 2004. P. 383.
23. Kulikova N., Badun G., Kunenkov E., Korobkov V., Tyasto Z., Chernysheva M., Tsvetkova E., Perminova I. / Proc. 14th Int Meeting IHSS. Moscow – Saint Petersburg, Russia. September 14-19, 2008. **2**. P. 425.
24. Kolotov V.P., Andriyanov A.Y., Dogadkin N.N., Shilobreeva S.N., Chapyzhnikov B.A., Tsipenyuk Y.M., Korobkov V.I. // J. Anal. Chem. 2003. **58**. P. 882.

TRITIUM LABEL – THE UNIQUE INSTRUMENT FOR STUDYING THE BEHAVIOR OF HUMIC SUBSTANCES IN NATURAL SYSTEMS

G.A. Badun, N.A. Kulikova, M.G. Chernysheva, Z.A. Tyasto, V.I. Korobkov, V.M. Fedoseev, E.A. Tsvetkova, A.I. Konstantinov, A.V. Kudryavtsev, I.V. Perminova

(Division of Radiochemistry, Division of Organic Chemistry)

Humic substances of different origin were labeled with tritium by means of thermal activation technique. High specific activity and radiochemical purity of labeled materials allowed direct estimation hydrophobicity and surface activity of humic substances as well as studying their behavior of in biological systems such as bacteria and higher plants.

Key words: tritium, labeled compounds, humic substances

Сведения об авторах: *Бадун Геннадий Александрович* – доцент кафедры радиохимии химического факультета МГУ, канд. хим. наук (badunga@yandex.ru), 939-47-93; *Куликова Наталья Александровна* – ст. науч. сотр. кафедры общего земледелия, факультет почвоведения МГУ, докт. биол. наук (939-55-46); *Чернышева Мария Григорьевна* – ст. науч. сотр. кафедры радиохимии химического факультета МГУ, канд. хим. наук (939-47-93); *Тясто Зинаида Александровна* – мл. науч. сотр. кафедры радиохимии химического факультета МГУ (939-47-93); *Коробков Виктор Иванович* – ст. науч. сотр. кафедры радиохимии химического факультета МГУ, канд. хим. наук (939-47-93); *Федосеев Владимир Михайлович* – зав. кафедрой радиохимии химического факультета МГУ, доктор химических наук, профессор (939-47-93); *Цветкова Евгения Александровна* – науч. сотр. Института органической химии им. Н.Д. Зелинского, канд. хим. наук ((499)1355316); *Константинов Андрей Иванович* – науч. сотр. кафедры органической химии химического факультета МГУ, канд. юр. наук (939-55-46); *Кудрявцев Алексей Валерьевич* – науч. сотр. кафедры органической химии химического факультета МГУ (939-55-46); *Перминова Ирина Васильевна* – вед. науч. сотр. кафедры органической химии химического факультета МГУ, докт. хим. наук (939-55-46)