

Оригинальная статья / Original article

УДК 66.085

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-2-339-348>

Анализ продуктов низкотемпературного СВЧ-пиролиза торфа

© Т.О Крапивницкая^{***}, С.А. Буланова^{**}, А.А. Сорокин^{**}, А.Н. Денисенко^{**},
Д.Л. Ворожцов^{*}, Л.Л. Семенычева^{*}

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Резюме: Для увеличения эффективности и интенсивности обработки органического природного каустобиолита – торфа, был разработан макет лабораторного СВЧ-реактора с увеличенным объемом загрузки обрабатываемого материала. Модернизированная экспериментальная установка представляет собой СВЧ-реактор при пониженном давлении с постоянным газовым отводом пиролизных газов через ловушку с жидким азотом в газовый пробоотборник. Увеличение объема микроволнового реактора было достигнуто благодаря применению дополнительных систем транспортировки микроволнового излучения и специальной системы поглощения отраженной мощности из объема реактора. Реактор подключался к источнику микроволнового излучения (промышленный магнетрон) частотой 2,45 ГГц, полной мощностью 1 кВт. Длительность микроволнового облучения торфа в реакторе составляла 16 мин. В результате серии экспериментов были получены и проанализированы образцы трех фракций – твердой, жидкой и газообразной. Проведен сравнительный анализ продуктов низкотемпературного пиролиза верхового сфагнового торфа, полученных при нагреве, основанном на теплопередаче от стенок реактора (обычный термический нагрев), и нагреве СВЧ-излучением. Главное отличие между нагревом излучением и теплопередачей состоит в том, что в первом случае происходит повышение температуры по всему объему, а не только в зоне границы раздела фаз, что повышает интенсификацию и эффективность процесса. Это в особенности проявляется при нагреве твердых объектов, в которых отсутствует передача тепла конвекцией. Сравнение продуктов трех полученных фракций проводилось с использованием данных анализа газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием, а также по результатам элементного анализа. Исследование показало, что при микроволновом нагреве происходит более глубокое разрушение исходного субстрата – до углеродистого остатка и низкомолекулярных продуктов неорганической и органической природы. Кроме того, поверхность твердой фракции была исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа; обнаружено наличие пористых структур с размерами пор от 5 до 7 мкм.

Ключевые слова: торф, микроволновый пиролиз, СВЧ-реактор, углеродистый остаток, низкомолекулярные продукты неорганической и органической природы, высокотехнологичная переработка торфа

Благодарности: Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Новые материалы и ресурсосберегающие технологии» и теме госзадания ИПФ РАН № 0035-2019-0001.

Информация о статье: Дата поступления 30 апреля 2020 г.; дата принятия к печати 29 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

Для цитирования: Крапивницкая Т.О., Буланова С.А., Сорокин А.А., Денисенко А.Н., Ворожцов Д.Л., Семенычева Л.Л. Анализ продуктов низкотемпературного СВЧ-пиролиза торфа. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2020. Т. 10. N 2. С. 339–348. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-2-339-348>

Analysis of the products of low-temperature microwave pyrolysis of peat

Tatiana O. Krapivnitskaia^{***}, Svetlana A. Bulanova^{**}, Andrey A. Sorokin^{**},
Andrey N. Denisenko^{**}, Dmitriy L. Vorozhtcov^{*}, Lyudmila L. Semenycheva^{*}

*Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, Nizhniy Novgorod, Russian Federation

**Institute of Applied Physics Russian Academy of Sciences,
Nizhniy Novgorod, Russian Federation

Abstract: To increase the efficiency and intensity of processing of organic natural caustobiolite or peat, a prototype laboratory microwave reactor with an increased loading volume of the processed material has been developed. The modernized experimental setup is a microwave reactor under reduced pressure with a constant removal of pyrolysis gases through a trap with liquid nitrogen into a gas sampler. The increase in the volume of the microwave reactor was achieved through the use of additional systems for transporting microwave radiation and a special system of absorption of reflected power from the reactor volume. The reactor was connected to a microwave source (industrial magnetron) with a frequency of 2.45 GHz, with a total power of 1 kW. The duration of microwave irradiation of peat in the reactor was 16 minutes. As a result of a series of experiments, samples of three fractions – solid, liquid, and gaseous – were obtained and analyzed. A comparative analysis of the products of low-temperature pyrolysis of bog sphagnum peat obtained by heating based on heat transfer from the walls of the reactor (conventional thermal heating) and heating by microwave radiation. The main difference between heating by radiation and heat transfer is that in the first case there is an increase in temperature throughout the volume, and not just in the zone of the phase boundary, which increases the intensification and the efficiency of the process. This is especially evident when heating solid objects in which there is no heat transfer by convection. Comparison of the products of the three fractions obtained was carried out using gas chromatography analysis data with mass-spectrometric detection, as well as using the results of elemental analysis. The study has shown that microwave heating causes a deeper destruction of the initial substrate – to the carbon residue and low molecular weight products of inorganic and organic nature. In addition, the surface of the solid fraction was examined using a scanning electron microscope; the presence of porous structures with pore sizes from 5 to 7 μm has been detected.

Keywords: peat, microwave pyrolysis, microwave reactor, carbon residue, low molecular weight products of inorganic and organic nature, high-tech peat processing

Acknowledgments: The study was carried out using the equipment of the Centre for Collective Use “New Materials and Resource-Saving Technologies” and state task for Institute of Applied Physics RAS no. 0035-2019-0001.

Information about the article: Received April 30, 2020; accepted for publication May 29, 2020; available online June 30, 2020.

For citation: Krapivnitskaya T.O., Bulanova S.A., Sorokin A.A., Denisenko A.N., Vorozhtsov D.L., Semenecheva L.L. Analysis of the products of low-temperature microwave pyrolysis of peat. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2020;10(2):339–348. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-2-339-348>

ВВЕДЕНИЕ

Мировые запасы торфа, по разным оценкам, составляют от 250 до 500 млрд т. Россия занимает второе место в мире по запасам торфа, при этом возобновление торфа оценивается в 260–280 млн т/г. Запасы торфа в России равномерно распределены по всей территории страны. Россия имеет долю в 5 % от мирового объема добычи торфа и занимает 4-е место в мире по этому показателю, находясь в одном ряду со Швецией, Канадой и Латвией. Стратегией развития торфяной промышленности России до 2030 г. намечено выполнение следующих рекомендаций: расширить использование торфа и продуктов его переработки; осуществить модернизацию и технологическое обновление производственной базы торфяной промышленности. Повсеместно торф используют как топливо, в сельском хозяйстве – в качестве удобрений, в животноводстве – как бактерицидную подстилку, в медицине – как противомикробное средство, в химической про-

мышленности – как исходное вещество для получения ценных продуктов, таких как метиловый и этиловый спирты, фенол, воск, парафин, молочная, уксусная и щавелевая кислоты, аммиак и др. [1–7]. Кроме того, после термической обработки торф можно использовать в качестве исходного вещества для получения низкомолекулярных соединений. В то же время существует опасность самовозгорания торфа непосредственно в месте его образования в летний период времени, поэтому появляется необходимость его переработки во избежание чрезвычайных ситуаций природного характера.

В настоящее время активно ведутся работы в области физико-химической переработки биоорганических материалов. По степени разложения (гумификации) торфяные залежи разделяются на залежи низкой степени разложения (до 20 % содержания в общей массе бесструктурной массы – гумуса), средней и высокой (более 35 %). По условиям образования торф подразделяют на низинный, переходный

Таблица 1

Основные компоненты сфагнового верхового торфа

Table 1

Main components of sphagnum top peat

Компонентный состав органической массы торфа	Массовая доля в составе, %
Целлюлоза	4–10
Гуминовые кислоты	15–50
Лигнин	5–20
Легкогидролизуемые соединения	20–40
Водорастворимые вещества	1–5

и верховой [8]. Торф имеет сложный химический состав (таблица 1), который определяется условиями генезиса, разнообразием растений-торфообразователей и степенью разложения [9].

Существуют методы переработки торфа, основанные на нагреве материала теплопередачей от стенок реактора (обычный термический нагрев) с добавлением алюмосиликатных катализаторов и без них [2–4]. Новые возможности открывает применение в химии мощного электромагнитного излучения различных частотных диапазонов, что обуславливает все больший интерес как с точки зрения фундаментальных исследований новых процессов реакций, так и создания новых высокотехнологичных приложений. Лабораторные установки, основанные на использовании СВЧ-излучения, позволили разнообразить органический синтез, в частности, на порядок увеличить скорости определенных реакций под его воздействием, синтезировать материалы с новыми свойствами и т.д. [10, 11].

Несмотря на большое количество работ, посвященных созданию СВЧ-комплексов для переработки органических материалов [12–14], доступные системы, работающие с разными видами органического топлива и способные обеспечить внедрение как в различные мелкие производства, так и в крупные высокотехнологичные промышленные комплексы, авторам не известны. Создание таких установок требует одновременного решения ряда химических (термических, массообменных и др.) и физических (электронных, электродинамических, термодинамических и др.) проблем, а также оптимизации физико-химических условий протекания реакций, специфичных для каждого из органических соединений (неоднородного и/или пористого характера среды, принципиального изменения характеристик среды в процессе протекания реакции, в определенном смысле вероятностного состава компонентов и продуктов реакции и др.). В случае традиционной схемы теплового пиролиза теплопроводность материалов ограничивает скорость подвода тепла в область реакции, а важнейшее преимущество СВЧ-метода заключается в объем-

ном нагреве материала, что обусловлено проникновением электромагнитных волн на значительную глубину. В результате осуществляется прямое преобразование СВЧ-энергии в тепловую в материалах с низкой теплопроводностью. Это позволяет оперативно регулировать скорость пиролитических реакций и состав продуктов на выходе, что является безусловным достоинством СВЧ-пиролиза.

Согласно результатам, представленным в работе [15], термическим разложением органического сырья под воздействием СВЧ-излучения при температурах 200–300 °С можно добиться довольно высокого выхода водорода. Данный факт свидетельствует о деструкции С-Н связи и, соответственно, указывает на наличие в продуктах непредельных и ароматических соединений, которые в свою очередь могут использоваться в органическом синтезе. При тепловом нагреве при температуре 400 °С происходит крекинг и получение легких предельных углеводородов, которые могут использоваться в топливной энергетике. Целью данного исследования является апробация лабораторного высокоэффективного СВЧ-реактора для переработки торфа и анализ продуктов низкотемпературного пиролиза торфа под воздействием СВЧ-излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве обрабатываемого органического материала был использован верховой сфагновый торф низкой степени разложения Греко-Ушаковского месторождения. Влажность – не более 65 %, содержание органического вещества – не менее 90 %, зольность – не более 10 %, кислотность – не менее 2,5 %. Торф соответствует ТУ-0391-001-51558809-2014.

В Институте прикладной физики Российской академии наук совместно с Нижегородским государственным университетом им. Н.И. Лобачевского был разработан экспериментальный стенд для микроволновой обработки материалов [16, 17]. Модернизированная экспериментальная установка, использованная в данной работе, в сравнении со стендом, описанным в работе [17], представляет собой СВЧ-реактор при пониженном давлении с постоянным газо-

вым отводом пиролизных газов через ловушку с жидким азотом с увеличенным объемом загрузки порядка 1 кг. Увеличение объема микроволнового реактора было достигнуто благодаря применению дополнительных систем транспортировки микроволнового излучения и специальной системы поглощения отраженной мощности из объема реактора, что способствовало более равномерному прогреву образца и увеличению процентного выхода полезных продуктов реакции. Давление контролировалось манометром и поддерживалось на уровне 10^{-1} Па. Температура в реакторе измерялась в постоянном режиме ТХА термпарой и составляла 250–350 °С. Объем выделившегося в результате реакции газа отслеживался газовым счетчиком. Форвакуум обеспечивался роторным насосом. Навеска с торфом (300 г) помещалась в СВЧ-реактор, спрессовывалась. Реактор подключался к источнику СВЧ частотой 2,45 ГГц, полной мощностью 1 кВт (магнетрон). Длительность СВЧ-воздействия составляла 16 мин. Блок-схема эксперимента представлена на рис. 1.

Кроме того, был проведен сравнительный эксперимент с тепловым нагревом при использовании электрического колбонагревателя марки ESB-4120. Навеска с торфом (100 г) помещалась в колбу объемом 500 г и погружалась в чашу колбонагревателя, далее подключалась к регулятору напряжения марки ES-2100. Температура в течение 5 мин выводилась на уровень 250–300 °С и поддерживалась на протяжении 15 мин.

В процессе серии экспериментов с электронагревательным элементом и с СВЧ-

нагревом образцы газовой, жидкой (маслянистая) и твердой фракций были отобраны в пробоотборники.

Газообразная и маслянистая фракции были проанализированы на хромато-масс-спектрометре GCMS QP2010 Ultra (Shimadzu, США). Газообразную пробу пиролизата торфа объемом 2,0 мл загружали газовым шприцом в инжектор хромато-масс-спектрометра. Образец смешивался с потоком газа-носителя (гелий высокой чистоты 6.0) при температуре испарителя 300 °С. Далее компоненты пробы разделялись на капиллярной хроматографической колонке Ultra ALLOY-5, при этом применяли температурное программирование (выдерживали 40 °С в колонке в течение 2 мин, затем повышали температуру со скоростью 10 °С/мин до 250 °С и далее поддерживали данную температуру). Обработку результатов хромато-масс-спектрометрического анализа проводили с использованием фирменного программного обеспечения Shimadzu (GC-MS Solution ver. 4.11), идентификация примесей происходила с помощью базы данных NIST 11. Анализ твердофазных проб осуществлялся с использованием элементного анализатора vario cube для одновременного определения CHNS(O) до и после проведения эксперимента. Наряду с этим твердая фракция (углеродистый остаток) была исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL 6390 LA (Япония). Образцы для электронно-микроскопических наблюдений были получены путем фиксации порошкообразных продуктов пиролиза торфа на медной подложке при помощи специального лака.



Рис. 1. Технологическая блок – схема процесса пиролиза торфа под воздействием СВЧ-излучения

Fig. 1. Technological flow diagram of the peat pyrolysis process under the influence of microwave radiation

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В связи с поставленной целью был проанализирован состав продуктов газообразной пробы, полученной при обычном термическом и СВЧ-нагреве, результаты представлены в виде совмещенной хроматограммы на рис. 2 (термический нагрев – линия красного цвета, СВЧ-нагрев – синего). Исходя из результатов, представленных на хроматограмме, можно сказать, что в газовой пробе преобладают неорганические газы, такие как CO₂, N₂.

В табл. 2 представлены данные о содержании в газовой фазе органических соединений разных классов. По данным хромато-масс-

спектрометрического анализа можно отметить, что при СВЧ-пиролизе в газовой фазе более характерны кислородсодержащие производные, включая гетероциклы (фуран, фурфураль), и значительно меньше непредельных соединений (столбец 2), чем в альтернативном случае (столбец 3), содержание предельных углеводов сопоставимо.

Кроме того, были проанализированы образцы жидкой (маслянистой) фракции. Сравнительный анализ соединений различных классов проб жидких фракций представлен в табл. 3.

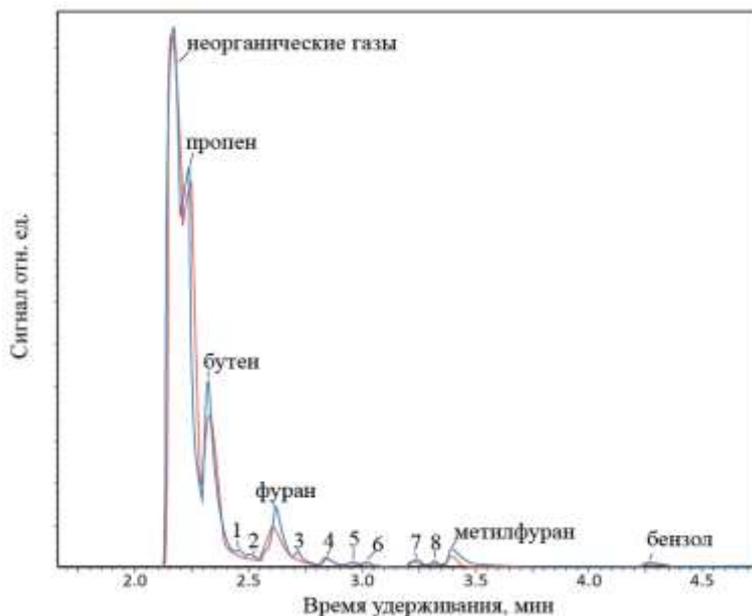


Рис. 2. Фрагменты хроматограмм газового пиролизата торфа при обычном термическом пиролизе (линия красного цвета) и при СВЧ-облучении (линия синего цвета):
 1 – изопентен; 2 – изопентан; 3 – изопентен; 4 – циклопентадиен; 5 – циклопентен;
 6 – изогексан; 7 – гексен; 8 – гексан; 9 – бензол

Fig. 2. Fragments of chromatograms of peat gas pyrolyzate during conventional thermal pyrolysis (red line) and microwave irradiation (blue line):
 1 – isopentene; 2 – isopentane; 3 – isopentene; 4 – cyclopentadiene; 5 – cyclopentene;
 6 – isohexane; 7 – hexene; 8 – hexane; 9 – benzene

Таблица 2
 Классы соединений, идентифицированные в образце газового пиролизата торфа при обычном термическом нагреве и СВЧ-облучении

Table 2

Classes of compounds identified in a sample of peat gas pyrolyzate under normal thermal heating and microwave irradiation

Класс соединений	Содержание, %	
	при СВЧ-нагреве	при нагреве с помощью колбонагревателя
Непредельные соединения	9,1	25,5
Предельные углеводороды	4,4	4,7
Карбонильные соединения	7,3	0,3
Ароматические углеводороды	1,2	0,6
Гетероциклические соединения	11,2	4,4
Растворенные неорганические газы	67,0	64,3

Таблица 3

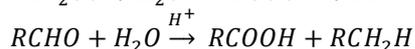
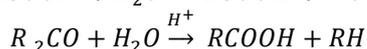
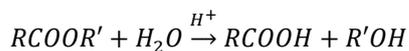
Классы соединений, идентифицированные в образце жидкого пиролизата торфа при нагреве с помощью колбонагревателя и при СВЧ-облучении

Table 3

Classes of compounds identified in a sample of liquid peat pyrolyzate when heated with a flask heater and under microwave irradiation

Класс соединений	Содержание, %	
	при СВЧ-нагреве	при нагреве с помощью колбонагревателя
Растворенные неорганические газы	Не обнаружено	0,4
Карбонильные соединения	0,2	5,0
Карбоксильные соединения	0,2	11,1
Спирты	0,3	1,9
Гетероциклические соединения	0,5	6,3
Фенольные соединения	Не обнаружено	2,8
Вода	98,9	71,5

Из данных, представленных в табл. 3, видно, что и в том, и другом случае основной компонент – вода. В жидкой фракции при СВЧ-нагреве отсутствуют неорганические газы, в то же время наблюдаются следовые количества кислородсодержащих соединений, а при обычном термическом нагреве имеют место следы неорганических газов, количественное содержание кислородсодержащих соединений, среди которых достаточно много карбоксильных соединений (табл. 3, столбец 3). Это согласуется с данными, приведенными в работе [18], где допускается, что при нагреве торфа в присутствии достаточного количества воды образуются карбоксильные производные:



Следует обратить внимание на то, что при интенсивном СВЧ-нагреве в жидкой фазе (см. табл. 3) в отличие от газовой фазы (см. табл. 2) не было обнаружено заметного присутствия кислородсодержащих соединений. Вероятно, в этом случае образуются только низкомолекулярные продукты такой природы, которые выделяются в газовой фазе (ацеталь-

дегид, метанол и т.п.).

В табл. 4 приведены результаты элементного анализа твердой фракции (углеродистого остатка) исходного торфа после его СВЧ-обработки в сравнении с обычным термическим нагревом. Углеродистый остаток, полученный в реакторе меньшего объема (результаты представлены в работе [17]), по процентному элементному составу очень схож с образцом, полученным в реакторе большего объема, что доказывает возможность выполнения подобных работ в промышленном масштабе.

С помощью сканирующего электронного микроскопа была исследована поверхность углеродистого остатка после СВЧ-обработки с высоким разрешением и глубиной резкости на поверхности образца. Изображения получены в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 10 кВ и увеличении в 330, 950 и 2500 раз (рис. 3). Размер пор колеблется в пределах от 5 до 7 мкм. Частицы продукта пиролиза имеют высокую пористость и развитую поверхность, наблюдаются структуры как образованные агломерированными гранулами, так и слоистые. Такие материалы широко применяются в качестве адсорбентов, носителей катализаторов, электродных материалов химических источников тока [19–22].

Таблица 4

Элементный состав углеродистого остатка исходного торфа

Table 4

Elemental composition of the carbon residue of the source peat

Образец исходного торфа	Массовая доля, %			
	азот	углерод	водород	сера
Перед СВЧ-нагревом	2–3	60–62	7–8	> 0,3
После СВЧ-нагрева	2–3	83–85	4–5	> 0,3
После теплового нагрева	1–2	64–65	4–6	> 0,3

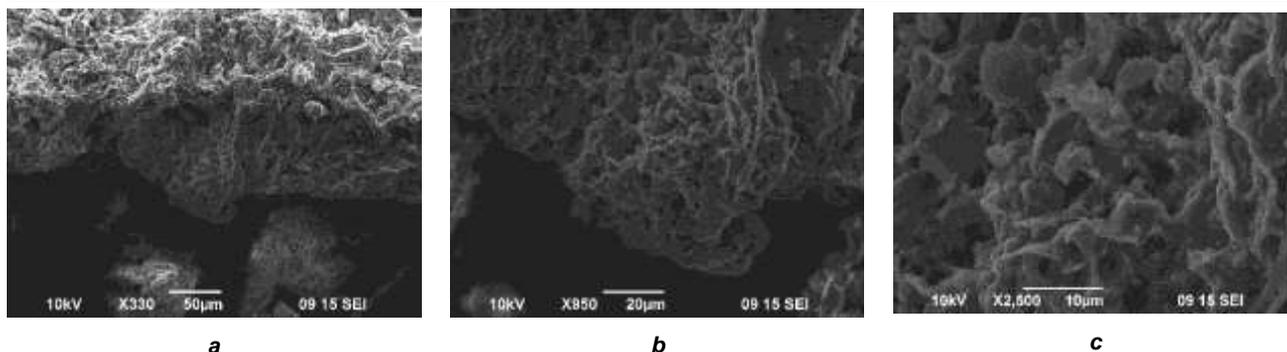


Рис. 3. Фотографии углеродистого остатка после СВЧ-обработки (увеличение: а – в 330 раз, б – в 950 раз, с – в 2500 раз)

Fig. 3. Photos of carbon residue after microwave processing (magnification: a – 330 times, b – 950 times, c – 2500 times)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена серия лабораторных исследований по обработке в реакторе повышенной загрузки верхового сфагнового торфа воздействием СВЧ-излучения с частотой 2,45 ГГц, мощностью 1 кВт и при пониженном давлении. Также осуществлена серия сравнительных экспериментов по «традиционному» термиче-

скому нагреву торфа. Были проанализированы образцы жидкой (маслянистой), газовой фракций и твердого остатка. Показано, что под воздействием СВЧ-излучения происходит более глубокое разрушение исходного субстрата до углеродистого остатка и низкомолекулярных продуктов неорганической и органической природы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Москаленко Т.В., Михеев В.А., Ворсина Е.В. Искусственно полученные гуминовые вещества для восстановления почв // Успехи современного естествознания. 2018. N 1. С. 109–114. <https://doi.org/10.17513/use.36659>
2. Степанов А.А., Шульга П.С., Госсе Д.Д., Смирнова М.Е. Применение природных гуматов для ремедиации загрязненных городских почв и стимулирования роста растений // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2018. N 2. С. 30–34.
3. Спиридонова А.М., Жернов Ю.В., Аввакумова Н.П., Зотова Л.М., Трошкина Н.П. Антивирусная активность фракций гуминовых веществ пелоидов в отношении штаммов вируса иммунодефицита человека 1 типа // Инфекция и иммунитет. 2012. Т. 1. N 1-2. С. 424.
4. Пат. № 2071490, Российская Федерация. Способ производства торфяного красителя на основе гуминовых кислот / О.И. Квасенков; патентообладатель ВНИИ консервной и овощесушильной промышленности; заявл. 22.07.1993, опубл. 10.01.1997.
5. Никифорова М.И. Преимущества использования торфяных таблеток сухого пресования для выращивания рассады // Гавриш. 2011. N 6. С. 35–36.
6. Маслов С.Г., Инишева Л.И. Торф – как растительное сырье и направления его химической переработки // Химия растительного сырья. 1998. N 4. С. 5–7.
7. Штин С.М. Применение торфа как топлива для малой энергетики // ГИАБ – Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. N 7. С. 82–96.
8. Куликова М.П., Куликова М.П., Куулар Л.Л. Исследование химического состава торфа // Фундаментальные исследования. 2013. N 4-1. С. 90–94;
9. Алферов В.В., Косивцов Ю.Ю., Чалов К.В., Луговой Ю.В. Термокаталитическая переработка торфа в присутствии алюмосиликатных катализаторов // Труды Инсторфа. 2013. N 8 (61). С. 18–22.
10. Пат. № 2259385, Российская Федерация. Способ переработки торфа / В.А. Котельников, А.И. Подзоров; заявл. 11.03.2004; опубл. 27.08.2005.
11. Удалов Е.И., Болотов В.А., Танашев Ю.Ю., Черноусов Ю.Д., Пармон В.Н. Пиролиз жидкого гексадекана в условиях селективного нагрева катализатора СВЧ-излучением // Теоретическая и экспериментальная химия. 2010. Т. 46. N 6. С. 370–377.
12. Чумаков Ю.А., Князева А.Г. Влияние сжимаемости тяжелых углеводов на макрокинетику их разложения под действием СВЧ-излучения // Химическая физика и мезоскопия. 2013. Т. 15. N 2. С. 179–187.
13. Передерий М.А., Хаджиев С.Н., Цодиков М.В. Деструкция токсичных соединений и нефтяных загрязнений при воздействии СВЧ-излучений // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. 2011. N 4 (72). С. 52–62.

14. Лиштван И.И. Физико-химические свойства торфа, химическая и термическая его переработка // Химия твердого топлива. 1996. N 3. С. 3–23.

15. Богдашов А.А., Крапивницкая Т.О., Песков Н.Ю. Моделирование тепловых и электродинамических процессов при СВЧ-пиролизе торфа // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2018): материалы 28-й Междунар. Крымской конф. (Севастополь, 9–15 сентября 2018 г.). Севастополь, 2018. Т. 6. С. 1381–1387.

16. Krapivnitskaia T.O., Bogdashov A.A., Denisenko A.N., Glyavin M.Yu., Kalynov Yu.K., Kuzikov S.V., et al. High-temperature microwave pyrolysis of peat as a method to obtaining liquid and gaseous fuel. EPJ Web of Conferences. 10th International Workshop 2017 "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications". 2017. Vol. 49. Article Number 02023. 2 p. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714902023>

17. Крапивницкая Т.О., Богдашов А.А., Денисенко А.Н., Песков Н.Ю., Глявин М.Ю., Семеничева Л.Л., Ворожцов Д.Л. Эксперимен-

тальное исследование СВЧ- пиролиза торфа // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология, 2019. Т. 9. N 4. С. 750–758. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-750-758>

18. Чухарева Н.В., Шишмина Л.В., Новиков А.А. Физико-химические характеристики торфяных гуминовых кислот и остатков их кислотного гидролиза // Химия растительного сырья. 2003. N 3. С. 11–15.

19. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. М.: Химия, 1989. 592 с.

20. Неймарк Н.Е. Синтетические минеральные адсорбенты и носители катализаторов. Киев: Наукова думка, 1982. 216 с.

21. Земскова Л.А. Модифицированные углеродные волокна: сорбенты, электродные материалы, катализаторы // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2009. N 2 (144). С. 39–52.

22. Патент № 2620404, Российская Федерация. Способ получения мезопористого углерода / А.Г. Ткачев, А.В. Мележик, Г.В. Соломахо; патентообладатель ООО «НаноТехЦентр»; заявл. 26.01.2016; опубл. 25.05.2017.

REFERENCES

1. Moskalenko TV, Mikheev VA, Vorsina EV. Artificially obtained humic substances for soil restoration. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* = Achievements of modern natural sciences. 2018;1:109–114. (In Russian) <https://doi.org/10.17513/use.36659>

2. Stepanov AA, Shulga PS, Gosse DD, Smirnova ME. Natural humates application for remediation of contaminated urban soils and stimulation of plant growth. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2018;2:30–34. (In Russian)

3. Spiridonov AM, Zhernov YuV, Avvakumova NP, Zotova LM, Troshkina NP. Antiviral activity of humic substance fractions of peloids in relation to human immunodeficiency virus type 1 strains. *Infektsiya i immunitet* = Russian Journal of Infection and Immunity. 2012;2(1-2):424. (In Russian)

4. Kvasenkov OI. *Method of production of peat dye based on humic acids*. Patent RF, no. 2071490;1997. (In Russian)

5. Nikiforenkov MI. Advantages of using dry pressed peat tablets for growing seedlings. *Gavriish*. 2011;6:35-36 (In Russian)

6. Maslov SG, Inisheva LI. Peat as a plant raw material and its chemical processing. *Khimija rastitel'nogo syr'ja* = Chemistry of plant raw material. 1998;4:5–7. (In Russian)

7. Shtin SM. Peat application as fuel for small power. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2011;7:82–96 (In Russian)

8. Kulikova MP, Kuular LL. Study the chemical composition of peat. *Fundamental'nye issledovaniya* 2013;4-1:90–94. (In Russian)

9. Alferov VV, Kosivtsov YuY, Chalov KV., Lugovoy YuV. Thermocatalytic peat processing in the presence aluminosilicate catalyst. *Trudy Instorfa*. 2013;8:18–22. (In Russian)

10. Kotel'nikov VA, Podzorov AI. *Peat processing method*. Patent RF, no. 2259385; 2004. (In Russian)

11. Udalov EI, Bolotov VA, Tanashev YuYu, Chernousov YuD, Parmon VN. Pyrolysis of liquid hexadecane under conditions of selective heating of the catalyst by microwave radiation. *Teoreticheskaya i eksperimental'naya khimiya*. 2010;46(6):370–377. (In Russian)

12. Chumakov YuA, Knyazeva AG. The influence of heavy hydrocarbons compressibility on the macrokinetics of ones decomposition under the microwave radiation. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* = Chemical Physics and Mesoscopies. 2013;15(2):179–187. (In Russian)

13. Perederii MA, Hadzhiev SN, Tsodikov MV. Destruction of toxic compounds and oil pollution when exposed to microwave radiation. *Vestnik Rossiiskogo fonda fundamental'nyh issledovaniy* = Russian Foundation for Basic Research Journal. 2011;4:52–62. (In Russian)

14. Lishtvan II. Physicochemical properties of peat, its chemical and thermal processing. *Khimiya tverdogo topliva*. 1996;3:3–23. (In Russian)

15. Bogdashov AA, Krapivnitskaya TO, Peskov NYu. Simulation of microwave pyrolysis of peat. In: *Microwave and Telecommunication*

Technology (CriMiCo-2018): Proceedings of the 28th International Crimean Conference, 9–15 September 2018, Sevastopol. 2018;6:1381–1387. (In Russian)

16. Krapivnitskaia TO, Bogdashov AA, Denisenko AN, Glyavin MYu, Kalynov YuK, Kuzikov SV, et al. High-temperature microwave pyrolysis of peat as a method to obtaining liquid and gaseous fuel. EPJ Web of Conferences. 10th International Workshop 2017 “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”. 2017;49. Article Number 02023. 2 p. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714902023>

17. Krapivnitskaia TO, Bogdashov AA, Denisenko AN, Peskov NYu, Glyavin MYu, Semenycheva LL, et al. Microwave pyrolysis experimental study of peat. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2019;9(4):750–758. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-750-758>

18. Chukhareva NV, Shishmina LV, Novikov AA. Physico-chemical characteristics of peat humic acids and residues of their acid hydrolysis *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* = Chemistry of plant raw material. 2003;3:11–15. (In Russian)

19. Kel'tsev NV. *The basics of adsorption technology*. Moscow: Khimiya; 1989. 592 p. (In Russian)

20. Neimark NE. *Synthetic mineral adsorbents and catalyst supports*. Kiev: Navukova dumka; 1982. 216 p. (In Russian)

21. Zemskova LA. Modified carbon fibers: sorbents, electrode materials, catalysts. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk* = Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences. 2009;2:39–52. (In Russian)

22. Tkachev AG, Melezhik AV, Solomakho GV. Method of obtaining mesoporous carbon. Patente RF, no. 2620404; 2016. (In Russian)

Критерии авторства

Крапивницкая Т.О., Буланова С.А., Сорокин А.А., Денисенко А.Н., Ворожцов Д.Л., Семенычева Л.Л. выполнили экспериментальную работу. Авторы совместно обобщили результаты, написали рукопись, имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Крапивницкая Татьяна Олеговна, аспирант, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603022, Нижний Новгород, пр-т Гагарина, 23, Российская Федерация; ведущий инженер, ФИЦ «Институт прикладной физики РАН», 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, Российская Федерация, e-mail: kto465@yandex.ru

Буланова Светлана Андреевна, инженер-исследователь, ФИЦ Институт прикладной физики РАН, 603950, г. Нижний Новгород,

Contribution

Tatiana O. Krapivnitskaia, Svetlana A. Bulanova, Andrey A. Sorokin, Andrey N. Denisenko, Dmitriy L. Vorozhtcov, Lyudmila L. Semenycheva carried out the experimental work. The authors on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. All authors have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatiana O. Krapivnitskaia, Postgraduate Student, Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, 23, Gagarin Ave., Nizhniy Novgorod, 603022, Russian Federation; Lead Engineer, Institute of Applied Physics RAS, 46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: kto465@yandex.ru

Svetlana A. Bulanova, Research Engineer, Institute of Applied Physics RAS, 46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,

ул. Ульянова,46,
Российская Федерация,
e-mail: bulanovasveta@mail.ru

Russian Federation,
e-mail: bulanovasveta@mail.ru

Сорокин Андрей Адольфович,
старший научный сотрудник,
ФИЦ Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород,
ул. Ульянова,46,
Российская Федерация,
e-mail: asorok@appl.sci-nnov.ru

Andrey A. Sorokin,
Senior Researcher,
Institute of Applied Physics Russian Academy
of Sciences,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
e-mail: asorok@appl.sci-nnov.ru

Денисенко Андрей Николаевич,
ведущий конструктор,
ФИЦ Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород,
ул. Ульянова,46,
Российская Федерация,
e-mail: androu@appl.sci-nnov.ru

Andrey N. Denisenko,
Leading Designer,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
e-mail: androu@appl.sci-nnov.ru

Ворожцов Дмитрий Леонидович,
к.х.н., ведущий инженер,
Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского,
603022, г. Нижний Новгород,
пр-т Гагарина, 23,
Российская Федерация,
e-mail: dmvorozh@gmail.com

Dmitriy L. Vorozhtcov,
Cand. Sci. (Chemistry), Lead Engineer,
Lobachevsky State University of Nizhniy Nov-
gorod,
23, Gagarin Ave., Nizhniy Novgorod, 603022,
Russian Federation,
e-mail: dmvorozh@gmail.com

Семенычева Людмила Леонидовна,
д.х.н., заведующая лабораторией
нефтехимии,
Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского,
603022, г. Нижний Новгород,
пр-т Гагарина, 23,
Российская Федерация,
e-mail: llsem@yandex.ru

Lyudmila L. Semenycheva,
Dr. Sci. (Chemistry), Head of Laboratory,
Lobachevsky State University
of Nizhniy Novgorod,
23, Gagarin Ave., Nizhniy Novgorod, 603022,
Russian Federation,
e-mail: llsem@yandex.ru