

УДК 544.478; 66.097

## НОСИТЕЛИ И КАТАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ГЕЛЕЙ (ОБЗОР)

© *Б.Н. Кузнецов<sup>1,2\*</sup>, Т.Г. Овчинникова<sup>1</sup>, О.П. Таран<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Институт химии и химической технологии СО РАН, ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», Академгородок, 50/24, Красноярск, 660036, Россия, [bnk-icct@yandex.ru](mailto:bnk-icct@yandex.ru)*

<sup>2</sup> *Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия*

Большинство процессов конверсии биомассы осуществляется в водных и водно-органических средах, что требует использования толерантных к воде катализаторов. К ним относятся углеродные катализаторы, в частности, на основе биоуглей, которые имеют такие недостатки, как наличие примесей, низкая прочность, неоднородная пористая структура. Эти недостатки отсутствуют у новых материалов на основе пористых углеродных гелей с регулируемой структурой.

В настоящем обзоре рассмотрены свойства углеродных гелей, полученных с использованием синтетических и природных фенольных соединений, а также твердых кислотных и металлосодержащих катализаторов на их основе. Использование лигнина древесины и танинов древесной коры позволяет снизить себестоимость получаемых гелей и повысить экологическую безопасность их производства.

Для введения металлов в углеродный каркас используются методы нанесения соединения металла на органический или углеродный гель; растворения соединения металла в смеси, используемой для синтеза органического геля; добавления в исходную смесь или органический гель добавок, связывающих ионы металла. Металлосодержащие углеродные гели все шире применяются в качестве катализаторов разнообразных каталитических реакций. Можно ожидать, что такие катализаторы будут востребованы во многих процессах переработки биомассы в востребованные продукты.

*Ключевые слова:* углеродные гели, синтез, строение, свойства, прекурсоры, танины, лигнины, металлосодержащие катализаторы.

---

**Для цитирования:** Кузнецов Б.Н., Овчинникова Т.Г., Таран О.П. Носители и катализаторы на основе углеродных гелей (обзор) // Химия растительного сырья. 2026. №1. С. 106–122. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260118320>.

---

### **Введение**

В последние годы в мире активно развиваются исследования по разработке эффективных методов получения ценных химических продуктов из возобновляемого сырья – лигноцеллюлозной биомассы, огромные и доступные ресурсы которого представлены древесными и сельскохозяйственными отходами. Традиционные технологии химической переработки лигноцеллюлозного сырья являются малопродуктивными, ориентированы на получение ограниченного ассортимента продуктов и наносят ущерб окружающей среде.

Новые перспективные технологии получения химических продуктов из биомассы основаны на использовании каталитических процессов. Поскольку процессы конверсии биомассы, как правило, осуществляются в водных и водно-органических средах, большинство промышленных катализаторов нефтехимии не пригодны для использования в таких условиях. Это стимулирует исследования по применению в процессах конверсии биомассы более толерантных к воде катализаторов на основе углеродных материалов [1].

Углеродные материалы имеют следующие достоинства: устойчивость в водных кислотных и щелочных средах, возможность регулирования пористой структуры в широких пределах, наличие реакционноспособных кислородсодержащих функциональных групп, которые способствуют повышению дисперсности нанесенного каталитически активного металла, термическая стабильность при высоких температурах в отсутствие кислорода, разнообразие физических форм пористого углерода, возможность регулирования

---

\* Автор, с которым следует вести переписку.

гидрофобно-гидрофильных свойств поверхности путем химической модификации, возможность регенераций активного металла путем выжигания углерода.

Катализаторы на структурированных углеродных носителях часто проявляют более высокую активность и стабильность, чем соответствующие объемные оксидные материалы, что обусловлено благоприятными взаимодействиями металл-углерод с участием кислородных групп или  $\pi$ - $\pi$ -функций на поверхности углеродных носителей.

Несмотря на эти достоинства, наличие примесей в углеродных материалах природного происхождения, невысокая прочность, сложность регулирования структуры ограничивают их применение в катализе. Эти ограничения отсутствуют у синтетических углеродных материалов с регулируемыми физическими и химическими характеристиками, в частности, углеродных гелях. Они могут быть получены путем карбонизации органических аэрогелей, синтезированных путем золь-гель поликонденсации некоторых органических мономеров, таких как резорцин и формальдегид [2–5]. Углеродные аэрогели могут быть получены в форме монолитов, гранул, порошков или тонких пленок с контролируемой микро/мезо/макропористой структурой и регулируемой плотностью. Благодаря этим свойствам углеродные аэрогели востребованы в катализе и адсорбции [6–9].

Поскольку большинство используемых прекурсоров, получаемых нефтехимическим синтезом, довольно токсичны (например, резорцин, фенол, формальдегид), в последние годы возрос интерес к синтезу углеродных аэрогелей с использованием новых экологически безопасных прекурсоров на основе возобновляемой растительной биомассы: целлюлозы [10–12], хитозана [13], лигнина [14–17], танина [18–20] и растительных отходов [21–24].

В настоящем обзоре рассмотрены методы приготовления и свойства углеродных аэрогелей, твердых катализаторов на их основе, а также возможности их использования в каталитических процессах.

### **Синтез и строение углеродных гелей**

Углеродные гели имеют контролируемую микро-мезо-макропористую структуры (рис. 1). Обычно их получают путем карбонизации органических гелей, синтезированных методом золь-гель поликонденсации различных органических мономеров. Наиболее широко изучены органические и углеродные гели, полученные из смесей резорцина и формальдегида в воде в присутствии основного или кислотного катализатора [4, 5]. Также при синтезе гелей использовали фенол [25–27], меламин [28] и крезол [29].

В процессе получения углеродных гелей можно выделить три основных этапа. Первый этап включает гелеобразование смеси и отверждение геля; второй этап – сушку влажного геля; третий этап – карбонизацию высушенного геля и иногда – активацию карбонизированного геля.

Реакция гелеобразования протекает медленно, и образующиеся так называемые узелки имеют относительно большой размер (порядка сотен нм), причем размер образующихся пор определяется пространством между узелками. Реакцию гелеобразования можно ускорить, а размер узелков – изменить путем вариации величины pH исходных растворов добавками кислот или оснований.

Процесс сушки оказывает существенное влияние на текстурные свойства углеродных аэрогелей [30]. Методы сушки углеродных аэрогелей подразделяются на: сублимационную сушку, сверхкритическую сушку и сушку при комнатной температуре. Высушенные органические гели классифицируются в зависимости от метода сушки на аэрогели (сверхкритическая сушка), криогели (криогенная сушка) и ксерогели (обычная сушка).

Сверхкритическая сушка позволяет получать гели с более высокопористой и однородной структурой, чем другие методы сушки [31].

Сублимационная криогенная сушка – это простой, относительно доступный и экологичный метод получения пористых углеродных аэрогелей [32, 33]. Растворитель в гидрогеле замораживается и удаляется сублимацией при низком давлении без образования границы раздела газ-жидкость. Скорость замораживания и концентрация прекурсора являются важными

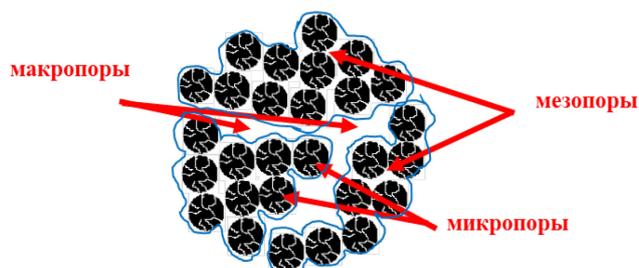


Рис. 1. Структура углеродного аэрогеля

факторами, определяющими пористую структуру. Быстро замороженные образцы содержат мелкие кристаллы льда, которые способствуют образованию мелких пор и большой площади поверхности пор.

Сушка при комнатной температуре является перспективным методом для крупномасштабного производства благодаря своей простоте и низкой стоимости [34]. Однако при этом создается значительное капиллярное натяжение на границе раздела твердое тело-жидкость-пар, что приводит к структурной усадке органического геля.

Карбонизация органического геля в инертной атмосфере ( $N_2$  или  $Ar$ ) способствует развитию его микропористой структуры. Образование в углеродном геле мезопор и макропор в большей степени зависит от начальных условий приготовления и сушки органического геля.

При умеренных температурах карбонизации (500–600 °С) объем и площадь поверхности микропор увеличиваются в результате выделения газообразных продуктов. При более высоких температурах карбонизации общий объем пор и площадь поверхности углеродного геля начинают снижаться. При очень высоких температурах карбонизации ( $\geq 2000$  °С) происходит частичная графитизация углеродного геля.

Углеродный гель может быть активирован водяным паром или  $CO_2$  при температурах 800–900 °С. Такая физическая активация увеличивает площадь поверхности, объем пор, их ширину и позволяет получить углеродные аэрогели с площадью поверхности по БЭТ до 3000  $m^2/g$  [35].

Химическая активация включает обработку углеродного геля активирующим агентом (гидроксиды щелочных металлов,  $ZnCl_2$ , кислоты) при нагревании. Этот метод требует последующих стадий промывки для удаления непрореагировавшего химического агента или побочных продуктов [36, 37].

Механические свойства углеродных гелей важны при их использовании в качестве адсорбентов и носителей катализаторов. Модуль упругости и прочность на сжатие гелей в значительной степени зависят от их плотности, которая определяется в основном объемом мезо- и макропор. Углеродные аэрогели различной плотности могут быть получены при вариации условий их синтеза [38, 39].

В последнее время возрос интерес к использованию для синтеза углеродных гелей природных полифенольных веществ – конденсированных танинов и лигнина, которые являются альтернативой токсичным резорцинолу и фенолу (рис. 2). Применение дубильных веществ, выделяемых из тропических растений (например, танины квербрахо и мимозы), позволило получить органические и углеродные ксерогели с контролируемой пористостью [18, 40].

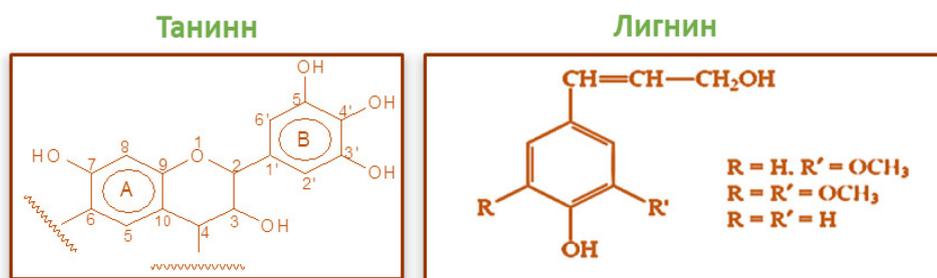


Рис. 2. Фрагменты структуры танинов и лигнина

Танины мимозы были использованы для синтеза углеродных микросфер с ультрамикропористой структурой [41]. Методика синтеза включала стадии эмульсионной полимеризации смеси танинов, формальдегида и суфрактаанта в подсолнечном масле, выделения микросфер танин-формальдегидного гидрогеля путем центрифугирования, сушки микросфер при комнатной температуре и пиролиза полученных микросфер ксерогеля при 900 °С. Средний размер полученных углеродных микросфер снижался от 200  $\mu m$  до 20  $\mu m$  с повышением скорости перемешивания смеси при синтезе микросфер гидрогеля и с ростом содержания суфрактаанта. Максимальная величина удельной поверхности полученного углеродного ксерогеля достигла 870  $m^2/g$ . Углеродный ксерогель имеет ультрамикропористую структуру (преобладают поры размером 0.4–0.5  $nm$ ). С учетом исключительно узкого распределения ультрамикропор по размерам, полученные углеродные микросферы могут использоваться в качестве углеродных молекулярных сит.

Перспективный подход к получению углеродных гелей основан на открытии гелеобразующих свойств аминированных танинов, подвергнутых гидротермальной обработке при 180 °С [42]. При этом не требуется формальдегид, и гидрогель можно сушить как в докритических, так и в сверхкритических

условиях или методом сублимационной сушки, что приводит к получению ксерогелей, аэрогелей и криогелей, легированных азотом. После пиролиза при 900 °С полученные углеродные гели имеют типичную узелковую структуру (размер узелков около 20 нм) и значительную долю мезопор.

Лигнин также является возобновляемым, дешевым и нетоксичным природным полимером фенольного типа. Из-за структурного сходства с фенолом, лигнин так же, как и танины, является альтернативой резорцинолу и фенолу при синтезе органических и углеродных гелей.

Биомасса хвойных деревьев имеет хорошие перспективы для использования в качестве дешевого и возобновляемого сырья для получения полифенольных веществ, представленных конденсированными танинами и лигнином. Использование лигнина древесины и танинов древесной коры позволяет снизить себестоимость получаемых гелей и повысить экологическую безопасность их производства.

Путем вариации природы полифенолов хвойных деревьев (сосны, пихты, лиственницы, кедра) и сшивающих агентов (формальдегид, фурфуроловый спирт, глутаровый альдегид), а также условий синтеза получен ассортимент пористых углеродных гелей, различающихся плотностью, пористостью, удельной поверхностью и соотношением микро-мезо-макропор.

Проведено сопоставление характеристик пористой структуры таннин-формальдегидных и таннин-фурфуроловых углеродных гелей, полученных в одинаковых условиях из таннинов, выделенных из коры сосны и кедра [43, 44]. Среди таннин-формальдегидных гелей самую высокую удельную поверхность имел углеродный гель, полученный при использовании таннинов кедра (540 м<sup>2</sup>/г), тогда как поверхность геля из таннинов сосны не превышает 184 м<sup>2</sup>/г. Наиболее высокой удельной поверхностью (585 м<sup>2</sup>/г) и объемом пор (0.7 см<sup>3</sup>/г) отличается углеродный таннин-фурфуроловый гель на основе таннинов сосны [44]. Использование глутарового альдегида для сшивки таннинов кедра приводит к снижению удельной поверхности углеродного геля до 377 м<sup>2</sup>/г по сравнению с таннин-формальдегидным гелем.

Разветвленная структура углеродного таннин-формальдегидного образца сформирована цепочками из агломератов достаточно однородных по размеру частиц сферической формы (рис. 3). Протяженные извилистые каналы пронизывают всю пористую сеть образца.

Добавление лигнина к таннинам сосны способствует возрастанию удельной поверхности углеродного таннин-формальдегидного геля в 2.6 раза (от 184 до 482 м<sup>2</sup>/г). Таннин-фурфуроловый гель существенно отличается от таннин-формальдегидного и таннин-глутарового углеродных гелей по строению и свойствам. Его удельная поверхность очень низкая (менее 1 м<sup>2</sup>/г). Он не только механически прочный, но и химически инертный.

Для регулирования строения углеродных гелей на основе таннинов предложено использовать добавки лигнинов. Были синтезированы и изучены углеродные гели на основе различных по своей природе таннинов и лигнинов [15, 43–47].

В работе [46] изучены свойства углеродных гелей полученных пиролизом органических таннин-формальдегидных и таннин-лигнин-формальдегидных ксерогелей с различной степенью замещения таннинов пихты на органосольвентный лигнин. Установлено, что пористая структура углеродных гелей определяется количеством лигнина, введенного в исходный органический гель. При низком его содержании (Т/Л = 1 : 0.5) образуется углеродный гель с повышенной плотностью (0.60 г/см<sup>3</sup>) и невысокой удельной поверхностью (290 м<sup>2</sup>/г). Повышение содержания лигнина до отношений Т/Л = 1 : 1 и 1 : 2 приводит к росту удельной поверхности до 457 и 536 м<sup>2</sup>/г соответственно, а также к снижению плотности углеродного геля до 0.20 и 0.13 г/см<sup>3</sup>.

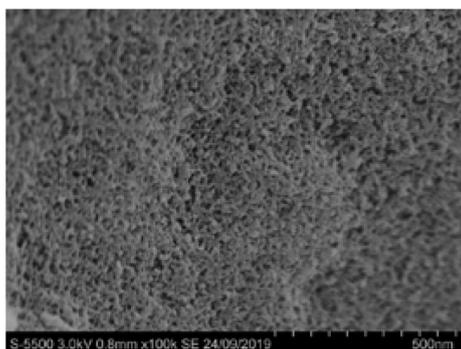
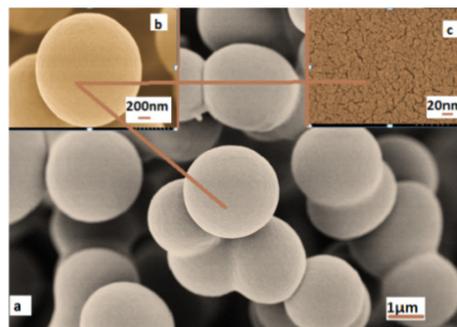
Методом СЭМ установлено, что размер частиц-глобул оказывает определяющее влияние на структуру гелей (рис. 4). Структура таннин-формальдегидного углеродного геля сформирована трехмерной сетью полимерных цепочек из однородных глобулярных частиц размером ≤10 нм. Менее упорядоченную структуру имеет углеродный гель с небольшим содержанием лигнина (Т/Л 1 : 0.5), в этом случае сросшиеся конгломераты частиц несимметричной формы образуют клубки размером в несколько десятков микрон. Микроструктура углеродных гелей с высоким содержанием лигнина (Т/Л = 1 : 1 и 1 : 2) сформирована скрученными полимерными цепочками из глобул частично измененной сферической формы с набором полостей размером 6–9 мкм.

Таким образом, при вариации отношения танины/лигнин можно регулировать плотность и пористую структуру углеродных таннин-лигнин-формальдегидных гелей, полученных с использованием таннинов и органосольвентного лигнина пихты.

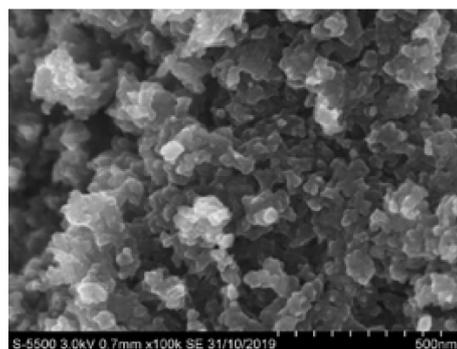
Показана возможность использования гидролизного лигнина и таннинов коры лиственницы для синтеза углеродных материалов аэрогельного типа [45]. Мелкодисперсный гидролизный лигнин, взятый в

определенном массовом соотношении с таннинами (5–30% мас), может участвовать в реакциях конденсации с формальдегидом или фурфуроловым спиртом с образованием смешанных таннин-лигнин-формальдегидных и таннин-лигнин-фурфуроловых органических гелей. Путем карбонизации органических гелей получены пористые углеродные таннин-лигнин-формальдегидные и таннин-лигнин-фурфуроловые гели. Эти углеродные гели являются микропористыми материалами с развитой удельной поверхностью. Введение гидролизного лигнина в состав исходного органического таннин-формальдегидного геля способствует возрастанию удельной поверхности углеродного геля от 237 до 407 м<sup>2</sup>·г<sup>-1</sup>, уменьшению кажущейся плотности с 0.61 до 0.37 г·см<sup>-3</sup>. Удельная поверхность углеродных таннин-лигнин-фурфуроловых гелей несколько выше, чем таннин-лигнин/формальдегидных и достигает 512 м<sup>2</sup>·г<sup>-1</sup> для образца с 20%-ным содержанием лигнина. Значения плотности таннин-лигнин/фурфуроловых гелей возрастают с 0.17 до 0.32 г·см<sup>-3</sup> с ростом содержания в них лигнина от 10 до 30 мас%.

Рис. 3. СЭМ-изображения образца таннин-формальдегидного углеродного геля, полученные при разных увеличениях: *a* – 1500 раз (общий вид); *b* – 50000 раз (отдельные частицы); *c* – 200000 раз (частицы показаны в сечении) [43]



*a* – углеродный ТФ ксерогель



*b* – углеродный ТЛФ ксерогель

Рис. 4. СЭМ-изображения образцов таннин-формальдегидного (*a*) и таннин-лигнин-формальдегидного (Т/Л=1 : 0.5) (*b*) углеродных гелей, полученных с использованием таннинов и органосольвентного лигнина пихты [15]

Для углеродных таннин-лигнин-формальдегидных гелей характерна трехмерная разветвленная структура, образованная агрегатами сферодальных частиц. СЭМ-изображения микроструктур формальдегидных гелей с различным содержанием лигнина отражают переход от сильно сшитой углеродной матрицы образца, содержащего 10%мас. лигнина с размером пор 15–30 нм к гомогенной зернистой структуре образца, содержащего 30 мас.% лигнина, с размером пор 30–50 нм.

Установлено, что добавление лигносульфонатов в количестве 10%мас. к таннинам коры лиственницы улучшает текстурные характеристики получаемых углеродных гелей, а также повышает их прочность [15].

Введение целлюлозы в состав органического таннин-формальдегидного геля на основе таннинов коры лиственницы меняет такие характеристики пористой структуры получаемых углеродных гелей, как удельная поверхность, общий объем пор, удельная поверхность микропор, объем микропор, объем мезопор, средний диаметр пор [48]. Развитие пористой структуры углеродных гелей, полученных с использованием добавок растворенной целлюлозы (10 и 20 мас%), происходит в результате формирования мезопор со средним диаметром 22.83 и 21.54 нм. Введение порошка целлюлозного аэрогеля в исходный органический гель способствует формированию микропор в получаемом углеродном геле. Наиболее развитую микропористую структуру имеет углеродный гель, полученный карбонизацией органического таннин-целлюлозного геля,

содержащего 20 мас% целлюлозного аэрогеля (удельная поверхность 754 м<sup>2</sup>/г). Методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что морфологию поверхности углеродных гелей, получаемых карбонизацией органических таннин-целлюлозных гелей, можно регулировать путем вариации как концентрации целлюлозы, так и ее состояния (раствор целлюлозы или порошок целлюлозного аэрогеля) при синтезе исходного органического геля (рис. 5).

#### *Синтез катализаторов на основе углеродных гелей*

Поверхность углеродных материалов проявляет кислотно-основные свойства благодаря наличию нескольких типов кислородсодержащих функциональных групп. Их можно получить путем функционализации поверхности углерода кислотами или основаниями.

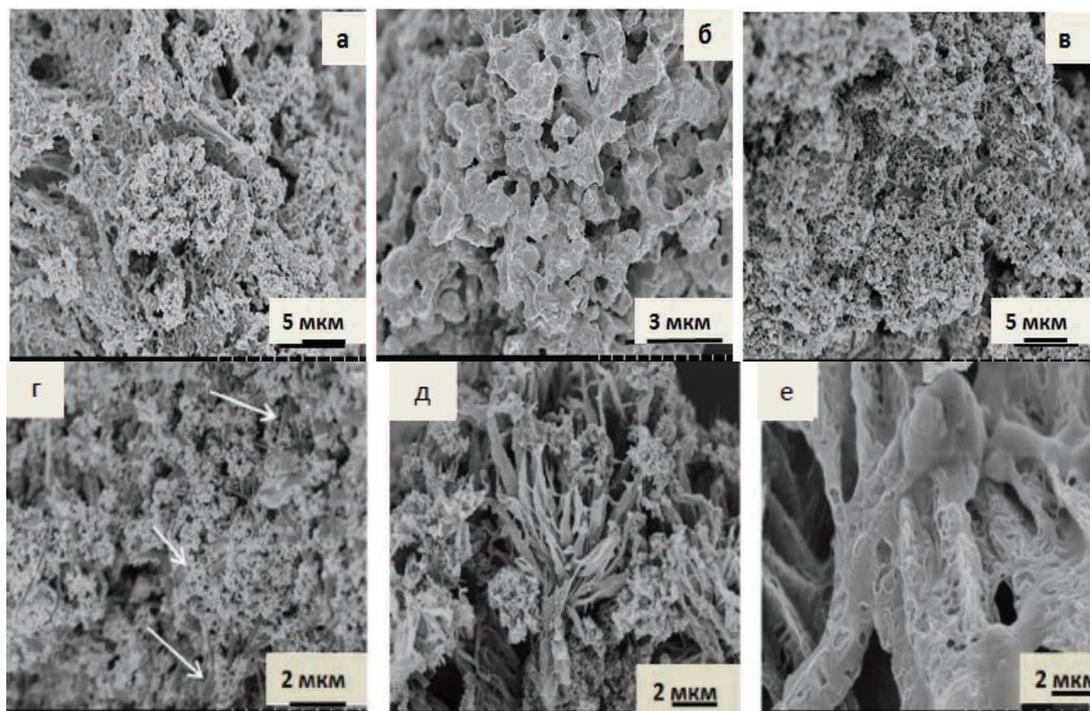


Рис. 5. СЭМ-изображения углеродных гелей, полученных карбонизацией таннин-целлюлозных гелей с различным содержанием растворенной целлюлозы: а – 0, б – 10, в – 20 (мас%) и порошка целлюлозного аэрогеля: г – 10, д – 20, е – 100 (мас%) [48]

Прямое сульфирование активированного угля приводит к образованию слабых (фенольные группы), средних (лактоновые группы) и сильных (карбоксильные и/или сульфогруппы) кислотных центров. Значительная потеря общего количества кислотных центров происходит при обработке этих материалов горячей водой (от 150 до 225 °С. Однако большая доля сильных кислотных центров остается на поверхности углерода после гидротермальной обработки [49].

Сульфатированные углеродные материалы содержат группы SO<sub>3</sub>H с кислотной силой по Гаммету от -8 до -11, что сопоставимо с концентрированной H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [50]. Кислотные углеродные катализаторы можно получить методом одностадийной гидротермальной карбонизации смеси п-толуолсульфокислота/глюкоза/резорцин при 180 °С [51]. Твердые кислотные катализаторы легко выделяются из жидкой фазы после реакции, что позволяет их повторно использовать при каталитическом гидролизе.

Сульфированный биоуголь с кислотностью 6.28 ммоль/г позволяет превратить целлюлозу в среде метанола при умеренных температурах в α, β-метилглюкозиды с выходом 90% [52]. При использовании сульфатированного СМК-3 (упорядоченный мезопористый углерод) в гидролизе целлюлозы достигнута степень конверсии 94.4% и выход глюкозы 74.5% [53].

Пористые углеродные гели имеют широкие перспективы применения в гетерогенном катализе. На их основе возможно приготовление твердых кислотных и металлсодержащих катализаторов с регулируемой структурой.

Для введения металлов в углеродный каркас используются три основных метода:

1. Нанесение металлического прекурсора на органический или углеродный гель различными методами.
2. Растворение металлического прекурсора в смеси, используемой для синтеза органического геля.
3. Введение функционализированного фрагмента с центрами связывания ионов металла в исходную смесь или в органический гель.

К настоящему времени получено и охарактеризовано большое количество углеродных гелей на основе резорцинола и формальдегида, содержащих различные металлы. Используемые способы заключались в нанесении соединений металла на углеродный гель различными методами: ионным обменом [54], адсорбцией [55], пропиткой [56], коллоидным [57].

В работах [58, 59] получены методом сверхкритического осаждения углеродные аэрогели, содержащие платину и рутений. Этот метод включал растворение металлоорганического прекурсора (диметил(1,5-циклооктадиен)платина (II) и трисацетил ацетонатные комплексы рутения) в сверхкритическом флюиде, обработку углеродного геля этим раствором и перевод прекурсора в металлическую форму термическим восстановлением. В этих углеродных аэрогелях размеры кристаллитов платины варьировались от 1.6 до 3.5 нм (в зависимости от содержания металла), а размер частиц Ru после термического восстановления при температурах от 300 до 1000 °С варьировался от 1.7 до 3.8 нм. Углеродные ксерогели, содержащие серебро, были получены путем пропитки органических ксерогелей водным раствором  $\text{AgNO}_3$  с последующей сушкой и нагревом при 300–900 °С в атмосфере азота [60].

При добавлении прекурсора металла к исходной смеси, используемой для синтеза органического геля, контролировать текстуру пор углеродной матрицы становится сложнее, поскольку прекурсор металла может влиять на химию золь-гель процесса, пиролиз органического аэрогеля и активацию углеродного аэрогеля. В процессе гелификации некоторые металлы могут хелатироваться функциональными группами органической матрицы, что способствует их хорошей дисперсии в углеродном геле.

Присутствие поверхностно-активного вещества в исходной смеси может не только определять свойства органических гелей, изменяя мицеллообразование, но эти молекулы также включаются в химическую структуру геля [61], создавая различные центры закрепления соединения металла. При использовании катионных или анионных солей-прекурсоров металла возникают различные притягивающие или отталкивающие взаимодействия между катионными и анионными поверхностно-активными веществами. В случае углеродных ксерогелей, содержащих Mo, полученных с использованием гептамолибдата аммония [62], притягивающие взаимодействия между катионным поверхностно-активным веществом (гексадецилтриметиламмонийбромидом, СТАВ) и анионным  $\text{MoO}_4^{2-}$ , способствуют более глубокому восстановлению молибдена с образованием  $\alpha\text{-Mo}_2\text{C}$  в процессе карбонизации.

Коллоидный метод был применен для приготовления катализаторов на основе Pt-содержащего углеродного геля с относительно высоким содержанием металла [63] с использованием  $\text{H}_2\text{PtCl}_6$  в качестве прекурсора Pt, тринатрийцитрата в качестве стабилизатора и боргидрида натрия в качестве восстановителя. Этот метод обеспечил равномерное распределение металлов по углеродной матрице в виде наноразмерных частиц.

Катализаторы на основе металлосодержащих углеродных гелей все шире применяются в разнообразных каталитических процессах [64–66]. Медьсодержащий катализатор для реакции гидрирования метилацетата был приготовлен путем пропитки водным раствором нитрата меди углеродного геля, синтезированного поликонденсацией смеси резорцинол-формальдегид-ТЕОС, с последующей карбонизацией при 900 °С, выщелачиванием кремния и активацией КОН при 750 °С [67]. Площадь поверхности активированного углеродного геля достигла 2562 м<sup>2</sup>/г. Cu-содержащий катализатор электрохимического восстановления  $\text{CO}_2$  был получен поликонденсацией смеси резорцинола, формальдегида и ацетата меди с последующей карбонизацией [68]. Углеродный гель содержит дисперсные частицы  $\text{Cu}^0$  и наиболее высокой активностью отличается образец, карбонизированный при 700 °С.

Допирование углеродного геля азотом может существенно повысить каталитическую активность нанесенного металла. Эффективный Pt-содержащий катализатор электрохимического восстановления кислорода был приготовлен путем поликонденсации смеси резорцинол-формальдегид-полиэтиленмин, закрепления ионов  $\text{PtCl}_6^{2-}$  на допированном азотом органическом геле и карбонизации геля при 900 °С [69]. Сферические наночастицы платины были равномерно распределены в углеродном геле.

Допированные азотом углеродные аэрогели, содержащие Fe, Co и Ni, могут быть использованы в качестве альтернативы Pt-содержащих катализаторам в реакции электрохимического восстановления кислорода.

В работе [70] катализатор электрохимического восстановления кислорода был получен путем тройного допирования гетероатомами (N, S и Fe) углеродного геля, синтезированного на основе фиброина шелка и  $\text{FeCl}_3$ . Каталитическую активность полученного электрокатализатора сопоставили с активностью коммерческого катализатора Pt/углерод.

В работах [71, 72] электрокатализаторы были приготовлены золь-гель полимеризацией органических прекурсоров с последующим введением в полученный органический гель Co или Fe путем ионного обмена и карбонизацией металлосодержащего геля. В качестве исходных реагентов использовали меламина, 2,6-дигидрокси-4-метилбензойную кислоту, формальдегид и карбонат натрия. Полученный органический гель пропитывали водными растворами  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$  или  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  и карбонизировали при 800 °С. Активность катализаторов в реакции электрохимического восстановления кислорода возрастала с увеличением содержания азота и металла в углеродном геле, причем Co-содержащий катализатор был более активен, чем Fe-содержащий образец.

Для приготовления углеродных гелей, допированных азотом и бором, использовали органический гель на основе кожуры помело, который обрабатывали водным раствором  $\text{NH}_4\text{NB}_4\text{O}_7$  и карбонизировали при 800 °С [73].

Фотокатализатор, содержащий наночастицы  $\text{Ag}_2\text{S}$  на углеродном аэрогеле, был значительно активнее в фотодеградациии метиленового синего, по сравнению с нанесенными наночастицами  $\text{Ag}_2\text{S}$  [74]. Существенным преимуществом этого фотокатализатора является возможность его выделения для повторного использования в процессе очистки воды. Фотокаталитическая активность  $\text{BiPO}_4$  в деградации метиленового синего была повышена в 7 раз путем нанесения наностержней  $\text{BiPO}_4$  на ультралегкий углеродный аэрогель [75].

В ряде работ описаны способы приготовления магнитных пористых углеродных гелей, которые легко выделяются из жидкой среды с помощью магнита [76–79]. Магнитный углеродный гель, содержащий частицы  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , был приготовлен поликонденсацией смеси натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы,  $\text{NH}_4\text{OH}$ ,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и лактона глюконовой кислоты (сшивающий агент) с последующей сушкой гидрогеля при 50 °С и карбонизацией при 950 °С [76]. Углеродный гель представлял собой мезопористый материал с плотностью 0.062 г/см<sup>3</sup> и площадью поверхности 742 м<sup>2</sup>/г. Магнитный нанофотокатализатор для деградации гидрохлорида тетрациклина в процессе Фентона получен путем комбинации пористого углеродного геля, частиц  $\text{FeO}_3$  и продукта взаимодействия  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  с бензол-1,3,5-трикарбоновой кислотой [77]. Катализатор имеет удельную поверхность 389 м<sup>2</sup>/г, средний размер пор – 2.4 нм и объем пор – 0.319 см<sup>3</sup>/г. Как предполагается, роль углеродного геля заключается в ускорении переноса фотогенерированных носителей заряда. Допированные азотом Ni-содержащие углеродные аэрогели являются магнитно-активными электрокатализаторами для реакций выделения водорода и восстановления 4-нитрофенола [78]. Синтез N-содержащего геля осуществляли гидротермальной обработкой хлопка и овалбумина, которые являются источниками углерода и азота с последующей криогенной сушкой. Нанесение никеля на гель проводили путем восстановления ацетата никеля гидразином. Содержание никеля в катализаторах варьировали от 45 до 75%. Катализатор, содержащий 60% Ni, проявлял лучшую электрокаталитическую активность среди исследованных образцов.

В работе [80] синтезированы и изучены железо- и никель-содержащие катализаторы очистки продуктов газификации биомассы, нанесенные на углеродные гели на основе микрофибриллированной целлюлозы. Обработанная  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  микрофибриллированная целлюлоза была карбонизирована при температурах 900, 1000, 1100 °С. Введение металла в углеродный гель осуществляли путем их пропитки водным раствором  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  с последующей термообработкой водородом при 700 °С. Текстульные характеристики образцов углеродных гелей варьировались в следующих пределах: удельная поверхность – от 327 до 464 м<sup>2</sup>/г, объем пор – 0.17 до 0.20 см<sup>3</sup>/г, размер пор – от 10.2 до 11.0 нм. Средний размер частиц металлов, нанесенных на углеродный гель, карбонизированный при 900 °С, составлял 24.7 нм для Fe и 28.9 нм – для Ni.

В работе [81] на примере Pt-содержащих углеродных гелей, синтезированных поликонденсацией резорцинола и формальдегида с последующей карбонизацией при 500, 900, 950 °С, изучено влияние структурных характеристик катализаторов на размер частиц Pt и активность в гидрогенолизе и изомеризации n-бутана. Нанесение Pt (2%мас.) осуществляли пропиткой углеродных гелей водным раствором  $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$  с последующей обработкой водородом при 400 °С. В зависимости от условий синтеза удельная поверхность катализаторов варьировалась от 592 до 618 м<sup>2</sup>/г, объем микропор – от 0.26 до 0.29 см<sup>3</sup>/г, объем мезопор – от 0.03 до 0.86 см<sup>3</sup>/г. В катализаторе с температурой карбонизации углеродного геля 900 °С более 80% частиц

Pt имеет размер менее 4 нм. Катализаторы, нанесенные на углеродные гели, карбонизированные при 900–950 °С, отличались высокой активностью в гидрогенолизе *n*-бутана. В случае катализатора, нанесенного на углеродный гель, карбонизированный при 500 °С, активность в гидрогенолизе и изомеризации *n*-бутана была сопоставима.

Для приготовления допированного оксидами марганца углеродного геля использовали смесь наноцеллюлозы (НЦ), поливинилпирролидона и  $MnAc_2$  [82]. Органический гель, полученный после криогенной сушки смеси, был карбонизирован при 850 °С с образованием углеродного композита НЦ/ $MnO_x$ . При карбонизации плотность геля возрастала от 0.01 до 0.16 см<sup>3</sup>/г. В образце НЦ/ $MnO_x$  доля мезопор (2.0–58.0 нм) составила около 80% и марганец присутствовал в виде смешанных оксидов  $Mn_3O_4$  и  $MnO$ . Допированные марганцем углеродные гели могут найти применение при получении суперконденсаторов и в качестве катализаторов реакций окисления.

Следует отметить, что до настоящего времени в литературе практически отсутствуют сведения об использовании катализаторов на основе углеродных гелей в процессах переработки возобновляемой растительной биомассы и ее компонентов. Также катализаторы имеют широкие перспективы практического использования для получения из древесных и сельскохозяйственных отходов разнообразных востребованных продуктов.

Преимущества твердых кислотных и металлсодержащих бифункциональных катализаторов на основе углеродных гелей обусловлены наличием отработанных методов регулирования их пористой структуры, состава поверхностных функциональных групп, размера частиц нанесенных каталитически активных металлов, гидрофильно-гидрофобных свойств поверхности, а также возможностью использования для их приготовления дешевых и доступных ресурсов возобновляемой растительной биомассы.

### **Заключение**

В настоящем обзоре рассмотрены методы приготовления и свойства пористых углеродных гелей, полученных с использованием синтетических и природных фенольных соединений, а также твердых кислотных и металлсодержащих катализаторов на их основе.

Углеродные гели с контролируемой микро-мезо-макропористой структурой традиционно получают карбонизацией органических гелей, синтезированных золь-гель поликонденсацией альдегидов (например, формальдегид) с фенольными соединениями (резорцинол, фенол).

Процесс получения углеродных гелей включает следующие этапы: гелеобразование смеси, сушку влажного геля, карбонизацию высушенного геля и иногда – активацию карбонизированного геля. В зависимости от условий сушки получают органические аэрогели, криогели и ксерогели с различной плотностью и пористой структурой. При карбонизации органического геля в инертной атмосфере происходит развитие микропористой структуры, а образование мезопор и макропор в углеродном геле в большей степени зависит от условий приготовления и сушки органического геля. Физическая активация водяным паром или  $CO_2$ , а также химическая активация гидроксидами щелочных металлов, солями, кислотами позволяет существенно повысить удельную поверхность и объем пор углеродного геля.

В последнее время возрос интерес к использованию для синтеза углеродных гелей экологически безопасных и доступных природных полифенольных веществ – таннинов и лигнина, которые являются альтернативой токсичным резорцинолу и фенолу.

Путем вариации природы полифенолов хвойных деревьев и сшивающих агентов (формальдегид, фурфуроловый спирт, глутаровый альдегид), а также условий синтеза получен ассортимент пористых углеродных гелей, различающихся плотностью, пористостью, удельной поверхностью и соотношением микро-мезо-макропор.

Пористые углеродные гели имеют широкие перспективы применения в гетерогенном катализе. На их основе возможно приготовление твердых кислотных и металлсодержащих катализаторов с регулируемой структурой. Преимущества твердых кислотных и металлсодержащих бифункциональных катализаторов на основе углеродных гелей обусловлены наличием отработанных методов регулирования их пористой структуры, состава поверхностных функциональных групп, размера частиц нанесенных каталитически активных металлов, гидрофильно-гидрофобных свойств поверхности, а также возможностью использования для их приготовления дешевых и доступных ресурсов возобновляемой растительной биомассы.

Методы введения металлов в углеродный каркас включают нанесение металлического прекурсора на органический или углеродный гель; растворение металлического прекурсора в смеси, используемой для синтеза органического геля; введение в исходную смесь или органический гель добавок соединения с центрами связывания ионов металла.

К настоящему времени предложены и описаны разнообразные методы синтеза металлсодержащих углеродных гелей на основе синтетических прекурсоров, в основном резорцинола и формальдегида. Рассмотрены примеры использования таких катализаторов в различных реакциях.

Следует подчеркнуть, что в литературе практически отсутствуют данные об использовании металлсодержащих углеродных катализаторов в процессах переработки биомассы, а также о синтезе металлсодержащих углеродных гелей на основе природных полифенолов. Можно ожидать, что дешевые катализаторы на основе углеродных гелей из растительного сырья будут актуальны в процессах получения востребованных продуктов из возобновляемой биомассы и ее компонентов.

#### **Благодарности**

*В работе использовано оборудование Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.*

#### **Финансирование**

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-13-20007 (<https://rscf.ru/project/25-13-20007/>), гранта Красноярского краевого фонда науки.*

#### **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. Lam E., Luong J.H. Carbon materials as catalyst supports and catalysts in the transformation of biomass to fuels and chemicals // *ACS catalysis*. 2014. Vol. 4, no. 10. Pp. 3393–3410. <https://doi.org/10.1021/cs5008393>.
2. Al-Muhtaseb S.A., Ritter J.A. Preparation and properties of resorcinol – formaldehyde organic and carbon gels // *Advanced materials*. 2003. Vol. 15, no. 2. Pp. 101–114. <https://doi.org/10.1002/adma.200390020>.
3. Biener J., Stadermann M., Suss M., Worsley M.A., Biener M.M., Rose K.A., Baumann T.F. Advanced carbon aerogels for energy applications // *Energy & Environmental Science*. 2011. Vol. 4, no. 3. Pp. 656–667. <https://doi.org/10.1039/C0EE00627K>.
4. ElKhatat A.M., Al-Muhtaseb S.A. Advances in tailoring resorcinol – formaldehyde organic and carbon gels // *Advanced materials*. 2011. Vol. 23, no. 26. Pp. 2887–2903. <https://doi.org/10.1002/adma.201100283>.
5. Li F., Xie L., Sun G., Kong Q., Su F., Cao Y., Wei J., Ahmad A., Guo X., Chen C.-M. Resorcinol-formaldehyde based carbon aerogel: Preparation, structure and applications in energy storage devices // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2019. Vol. 279. Pp. 293–315. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.12.007>.
6. Moreno-Castilla C., Maldonado-Hódar F. Carbon aerogels for catalysis applications: An overview // *Carbon*. 2005. Vol. 43, no. 3. Pp. 455–465. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.10.022>.
7. Moreno-Castilla C. Carbon gels in catalysis // *Carbon materials for catalysis*. 2008. Pp. 373–399.
8. Gan G., Li X., Fan S., Wang L., Qin M., Yin Z., Chen G. Carbon aerogels for environmental clean-up // *European journal of inorganic chemistry*. 2019. Vol. 2019, no. 27. Pp. 3126–3141. <https://doi.org/10.1002/ejic.201801512>.
9. Sam D.K., Sam E.K., Durairaj A., Lv X., Zhou Z., Liu J. Synthesis of biomass-based carbon aerogels in energy and sustainability // *Carbohydrate research*. 2020. Vol. 491. 107986. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.107986>.
10. Long L.-Y., Weng Y.-X., Wang Y.-Z. Cellulose aerogels: Synthesis, applications, and prospects // *Polymers*. 2018. Vol. 10, no. 6. 623. <https://doi.org/10.3390/polym10060623>.
11. Kuznetsov B.N., Vasilyeva N.Y., Mikova N.M., Zhizhaev A.M. Synthesis and Sulfation with Sulfamic Acid of Aerogels Based on Birch-Wood and Cotton Celluloses // *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2022. Vol. 15, no. 1. Pp. 57–68. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0271>.
12. Zhang T., Yuan D., Guo Q., Qiu F., Yang D., Ou Z. Preparation of a renewable biomass carbon aerogel reinforced with sisal for oil spillage clean-up: Inspired by green leaves to green Tofu // *Food and Bioproducts Processing*. 2019. Vol. 114. Pp. 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.12.007>.
13. Peng H., Wu J., Wang Y., Wang H., Liu Z., Shi Y., Guo X. A facile approach for preparation of underwater superoleophobicity cellulose/chitosan composite aerogel for oil/water separation // *Applied Physics A*. 2016. Vol. 122, no. 5. 516. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0049-0>.

14. Grishechko L., Amaral-Labat G., Szczurek A., Fierro V., Kuznetsov B., Pizzi A., Celzard A. New tannin–lignin aerogels // *Industrial Crops and Products*. 2013. Vol. 41. Pp. 347–355. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.052>.
15. Микова Н., Скворцова Г., Иванов И., Левданский В., Кузнецов Б. Влияние лигнина на свойства органических и углеродных гелей из полифенолов коры лиственницы // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. 2017. Т. 10, №3. Pp. 368–380. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0033>.
16. Yang B.S., Kang K.-Y., Jeong M.-J. Preparation of lignin-based carbon aerogels as biomaterials for nano-supercapacitor // *Journal of the Korean Physical Society*. 2017. Vol. 71, no. 8. Pp. 478–482. <https://doi.org/10.3938/jkps.71.478>.
17. Xu J., Zhou X., Chen M., Shi S., Cao Y. Preparing hierarchical porous carbon aerogels based on enzymatic hydrolysis lignin through ambient drying for supercapacitor electrodes // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2018. Vol. 265. Pp. 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.02.024>.
18. Szczurek A., Amaral-Labat G., Fierro V., Pizzi A., Celzard A. The use of tannin to prepare carbon gels. Part II. Carbon cryogels // *Carbon*. 2011. Vol. 49, no. 8. Pp. 2785–2794. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.03.005>.
19. Mikova N., Levdanskiy V., Skwortsova G., Zhizhaev A., Lutoshkin M., Chesnokov N., Kuznetsov B. Structure and properties of organic xerogels derived from tannins and ethanol lignins of the Siberian fir // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2021. Vol. 11, no. 5. Pp. 1565–1573. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00561-8>.
20. Amaral-Labat G., Grishechko L., Fierro V., Kuznetsov B., Pizzi A., Celzard A. Tannin-based xerogels with distinctive porous structures // *Biomass and bioenergy*. 2013. Vol. 56. Pp. 437–445. <https://doi.org/10.1016/J.BIOM-BIOE.2013.06.001>.
21. Szczurek A., Amaral-Labat G., Fierro V., Pizzi A., Celzard A. New families of carbon gels based on natural resources // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2013. Vol. 416. 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/416/1/012022>.
22. Yue X., Zhang T., Yang D., Qiu F., Li Z. Hybrid aerogels derived from banana peel and waste paper for efficient oil absorption and emulsion separation // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 199. Pp. 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.181>.
23. Jing Z., Ding J., Zhang T., Yang D., Qiu F., Chen Q., Xu J. Flexible, versatility and superhydrophobic biomass carbon aerogels derived from corn bracts for efficient oil/water separation // *Food and Bioproducts Processing*. 2019. Vol. 115. Pp. 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.03.010>.
24. Vazhayal L., Wilson P., Prabhakaran K. Waste to wealth: Lightweight, mechanically strong and conductive carbon aerogels from waste tissue paper for electromagnetic shielding and CO<sub>2</sub> adsorption // *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 381. 122628. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122628>.
25. Scherdel C., Reichenauer G. Carbon xerogels synthesized via phenol–formaldehyde gels // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2009. Vol. 126, no. 1-2. Pp. 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.05.033>.
26. Wu D., Fu R., Sun Z., Yu Z. Low-density organic and carbon aerogels from the sol–gel polymerization of phenol with formaldehyde // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2005. Vol. 351, no. 10-11. Pp. 915–921. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2005.02.008>.
27. Grishechko L.I., Amaral-Labat G.I., Szczurek A., Fierro V., Kuznetsov B.N., Celzard A. Lignin-phenol-formaldehyde aerogels and cryogels // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2013. Vol. 168. Pp. 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.09.024>.
28. Salinas-Torres D., Léonard A.F., Stergiopoulos V., Busby Y., Pireaux J.-J., Job N. Effect of nitrogen doping on the pore texture of carbon xerogels based on resorcinol-melamine-formaldehyde precursors // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2018. Vol. 256. Pp. 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.08.004>.
29. Zhu Y., Hu H., Li W.-C., Zhang X. Cresol-formaldehyde based carbon aerogel as electrode material for electrochemical capacitor // *Journal of Power Sources*. 2006. Vol. 162, no. 1. Pp. 738–742. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.06.049>.
30. Job N., Théry A., Pirard R., Marien J., Kocon L., Rouzaud J.-N., Béguin F., Pirard J.-P. Carbon aerogels, cryogels and xerogels: Influence of the drying method on the textural properties of porous carbon materials // *Carbon*. 2005. Vol. 43, no. 12. Pp. 2481–2494. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.04.031>.
31. Liu N., Zhang S., Fu R., Dresselhaus M.S., Dresselhaus G. Carbon aerogel spheres prepared via alcohol supercritical drying // *Carbon*. 2006. Vol. 44, no. 12. Pp. 2430–2436. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.04.032>.
32. Yamamoto T., Nishimura T., Suzuki T., Tamon H. Control of mesoporosity of carbon gels prepared by sol–gel polycondensation and freeze drying // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2001. Vol. 288, no. 1-3. Pp. 46–55. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(01\)00619-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(01)00619-6).
33. Zainol M.M., Amin N.A.S., Asmadi M. Synthesis and characterization of carbon cryogel microspheres from lignin-furfural mixtures for biodiesel production // *Bioresource technology*. 2015. Vol. 190. Pp. 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.067>.
34. Robertson C., Mokaya R. Microporous activated carbon aerogels via a simple subcritical drying route for CO<sub>2</sub> capture and hydrogen storage // *Microporous and mesoporous materials*. 2013. Vol. 179. Pp. 151–156. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2013.05.025>.
35. Hanzawa Y., Hatori H., Yoshizawa N., Yamada Y. Structural changes in carbon aerogels with high temperature treatment // *Carbon*. 2002. Vol. 40, no. 4. Pp. 575–581. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(01\)00150-6](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00150-6).
36. Zubizarreta L., Arenillas A., Pirard J.-P., Pis J.J., Job N. Tailoring the textural properties of activated carbon xerogels by chemical activation with KOH // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2008. Vol. 115, no. 3. Pp. 480–490. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2008.02.023>.

37. Yu M., Li J., Wang L. KOH-activated carbon aerogels derived from sodium carboxymethyl cellulose for high-performance supercapacitors and dye adsorption // *Chemical engineering journal*. 2017. Vol. 310. Pp. 300–306. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.121>.
38. Aegerter M.A., Leventis N., Koebel M. *Advances in sol-gel derived materials and technologies* // *Aerogels Handbook*. New York, 2011.
39. Rey-Raap N., Szczurek A., Fierro V., Celzard A., Menéndez J.A., Arenillas A. Advances in tailoring the porosity of tannin-based carbon xerogels // *Industrial Crops and Products*. 2016. Vol. 82. Pp. 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.001>.
40. Pizzi A. Tannin-based biofoams-A review // *Journal of Renewable Materials*. 2019. Vol. 7, no. 5. Pp. 474–489. <https://doi.org/10.32604/jrm.2019.06511>.
41. Grishechko L., Amaral-Labat G., Fierro V., Szczurek A., Kuznetsov B., Celzard A. Biosourced, highly porous, carbon xerogel microspheres // *RSC Advances*. 2016. Vol. 6, no. 70. Pp. 65698–65708. <https://doi.org/10.1039/C6RA09462G>.
42. Braghioroli F., Fierro V., Izquierdo M., Parmentier J., Pizzi A., Celzard A. Nitrogen-doped carbon materials produced from hydrothermally treated tannin // *Carbon*. 2012. Vol. 50, no. 15. Pp. 5411–5420. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.07.027>.
43. Микова Н.М., Иванов И.П., Жижаев А.М., Кузнецов Б.Н. Синтез и свойства углеродных гелей на основе полифенолов сосны и кедра // *Химия растительного сырья*. 2025. №3. С. 101–113. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250316854>.
44. Mikova N., Ivanov I., Fetisova O.Y., Kazachenko A., Kuznetsov B. Characterization of the pine biomass derived tannin-furfuryl carbon xerogels // *Bioresource Technology Reports*. 2023. Vol. 22. 101454. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101454>.
45. Микова Н., Иванов И., Жижаев А., Цыганова С., Кузнецов Б. Синтез и свойства углеродных гелей на основе таннинов коры лиственницы и гидролизного лигнина // *Журнал прикладной химии*. 2022. Т. 95, №3. С. 344. <https://doi.org/10.31857/S0044461822030069>.
46. Микова Н., Жижаев А., Иванов И., Лутошкин М., Кузнецов Б. Изучение строения и свойств углеродных гелей из лигнина и таннинов пихты // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. 2020. Т. 13, №1. С. 109–121. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0160>.
47. Микова Н., Иванов И., Левданский В., Кузнецов Б. Синтез и изучение свойств органических и углеродных ксерогелей из таннинов коры пихты // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. 2020. Т. 13, №2. С. 175–188. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0173>.
48. Микова Н., Иванов И., Жижаев А., Кузнецова С., Кузнецов Б. Структура углеродных гелей, полученных карбонизацией органических ксерогелей на основе таннинов коры лиственницы и целлюлозы сосны // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. 2023. Т. 16, №1. С. 96–106.
49. Van Pelt A.H., Simakova O.A., Schimming S.M., Ewbank J.L., Foo G.S., Pidko E.A., Hensen E.J., Sievers C. Stability of functionalized activated carbon in hot liquid water // *Carbon*. 2014. Vol. 77. Pp. 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.05.015>.
50. Okamura M., Takagaki A., Toda M., Kondo J.N., Domen K., Tatsumi T., Hara M., Hayashi S. Acid-catalyzed reactions on flexible polycyclic aromatic carbon in amorphous carbon // *Chemistry of Materials*. 2006. Vol. 18, no. 13. Pp. 3039–3045. <https://doi.org/10.1021/cm0605623>.
51. Zhang W., Tao H., Zhang B., Ren J., Lu G., Wang Y. One-pot synthesis of carbonaceous monolith with surface sulfonic groups and its carbonization/activation // *Carbon*. 2011. Vol. 49, no. 6. Pp. 1811–1820. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.12.050>.
52. Dora S., Bhaskar T., Singh R., Naik D.V., Adhikari D.K. Effective catalytic conversion of cellulose into high yields of methyl glucosides over sulfonated carbon based catalyst // *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 120. Pp. 318–321. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.036>.
53. Pang J., Wang A., Zheng M., Zhang T. Hydrolysis of cellulose into glucose over carbons sulfonated at elevated temperatures // *Chemical Communications*. 2010. Vol. 46, no. 37. Pp. 6935–6937. <https://doi.org/10.1039/C0CC02014A>.
54. Cotet L., Gich M., Roig A., Popescu I., Cosoveanu V., Molins E., Danciu V. Synthesis and structural characteristics of carbon aerogels with a high content of Fe, Co, Ni, Cu, and Pd // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2006. Vol. 352, no. 26–27. Pp. 2772–2777. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.03.039>.
55. Ribeiro A.P.d.C., Martins L.M.D.R.d.S., Carabineiro S.A.C., Figueiredo J.L., Pombeiro A.J.L. Gold nanoparticles deposited on surface modified carbon xerogels as reusable catalysts for cyclohexane CH activation in the presence of CO and water // *Molecules*. 2017. Vol. 22, no. 4. 603. <https://doi.org/10.3390/molecules22040603>.
56. Morales-Torres S., Maldonado-Hódar F., Pérez-Cadenas A., Carrasco-Marín F. Design of low-temperature Pt-carbon combustion catalysts for VOC's treatments // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 183, no. 1–3. Pp. 814–822. <https://doi.org/10.3390/10.1016/j.jhazmat.2010.07.100>.
57. Moreno-Castilla C., Maldonado-Hódar F., Pérez-Cadenas A. Physicochemical surface properties of Fe, Co, Ni, and Cu-doped monolithic organic aerogels // *Langmuir*. 2003. Vol. 19, no. 14. Pp. 5650–5655. <https://doi.org/10.1021/la034536k>.
58. Saquing C.D., Kang D., Aindow M., Erkey C. Investigation of the supercritical deposition of platinum nanoparticles into carbon aerogels // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2005. Vol. 80, no. 1–3. Pp. 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2004.11.019>.

59. Zhang Y., Kang D., Aindow M., Erkey C. Preparation and characterization of ruthenium/carbon aerogel nanocomposites via a supercritical fluid route // *The Journal of Physical Chemistry B*. 2005. Vol. 109, no. 7. Pp. 2617–2624. <https://doi.org/10.1021/jp0467595>.
60. Zhang S., Fu R., Wu D., Xu W., Ye Q., Chen Z. Preparation and characterization of antibacterial silver-dispersed activated carbon aerogels // *Carbon*. 2004. Vol. 42, no. 15. Pp. 3209–3216. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.08.004>.
61. Jirglová H., Maldonado-Hódar F.J. Chemical interactions of surface-active agents with growing resorcinol-formaldehyde gels // *Langmuir*. 2010. Vol. 26, no. 20. Pp. 16103–16109. <https://doi.org/10.1021/la102499h>.
62. Maldonado-Hódar F.J., Jirglová H., Pérez-Cadenas A.F., Morales-Torres S. Chemical control of the characteristics of Mo-doped carbon xerogels by surfactant-mediated synthesis // *Carbon*. 2013. Vol. 51. Pp. 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.08.046>.
63. Zubiatur A., Job N. Streamlining of the synthesis process of Pt/carbon xerogel electrocatalysts with high Pt loading for the oxygen reduction reaction in proton exchange membrane fuel cells applications // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2018. Vol. 225. Pp. 364–378. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.11.059>.
64. Lee J.-H., Park S.-J. Recent advances in preparations and applications of carbon aerogels: A review // *Carbon*. 2020. Vol. 163. Pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.02.073>.
65. Yu S., Song S., Li R., Fang B. The lightest solid meets the lightest gas: An overview of carbon aerogels and their composites for hydrogen related applications // *Nanoscale*. 2020. Vol. 12, no. 38. Pp. 19536–19556. <https://doi.org/10.1039/D0NR05050D>.
66. Shaari N., Kamarudin S.K. Current status, opportunities, and challenges in fuel cell catalytic application of aerogels // *International Journal of Energy Research*. 2019. Vol. 43, no. 7. Pp. 2447–2467. <https://doi.org/10.1002/er.4423>.
67. Hou X., Zhao J., Liu J., Han Y., Pei Y., Ren J. Activated carbon aerogel supported copper catalysts for the hydrogenation of methyl acetate to ethanol: effect of KOH activation // *New Journal of Chemistry*. 2019. Vol. 43, no. 24. Pp. 9430–9438. <https://doi.org/10.1039/C9NJ01434A>.
68. Xiao X., Xu Y., Lv X., Xie J., Liu J., Yu C. Electrochemical CO<sub>2</sub> reduction on copper nanoparticles-dispersed carbon aerogels // *Journal of colloid and interface science*. 2019. Vol. 545. Pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.03.005>.
69. Kim G.-P., Lee M., Lee Y.J., Bae S., Song H.D., Song I.K., Yi J. Polymer-mediated synthesis of a nitrogen-doped carbon aerogel with highly dispersed Pt nanoparticles for enhanced electrocatalytic activity // *Electrochimica Acta*. 2016. Vol. 193. Pp. 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.02.064>.
70. Li C., Sun F., Lin Y. Refining cocoon to prepare (N, S, and Fe) ternary-doped porous carbon aerogel as efficient catalyst for the oxygen reduction reaction in alkaline medium // *Journal of Power Sources*. 2018. Vol. 384. Pp. 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.01.020>.
71. Sarapu A., Samolberg L., Kreek K., Koel M., Matisen L., Tammeveski K. Cobalt-and iron-containing nitrogen-doped carbon aerogels as non-precious metal catalysts for electrochemical reduction of oxygen // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2015. Vol. 746. Pp. 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.03.021>.
72. Sarapu A., Kreek K., Kisand K., Kook M., Uibu M., Koel M., Tammeveski K. Electrocatalysis of oxygen reduction by iron-containing nitrogen-doped carbon aerogels in alkaline solution // *Electrochimica Acta*. 2017. Vol. 230. Pp. 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.01.157>.
73. Zhu L., Jiang H., Ran W., You L., Yao S., Shen X., Tu F. Turning biomass waste to a valuable nitrogen and boron dual-doped carbon aerogel for high performance lithium-sulfur batteries // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 489. Pp. 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.333>.
74. Hu H., Wei W., Jiang Z., Sun W., Lv X., Xie J. In situ formation of small-scale Ag<sub>2</sub>S nanoparticles in carbonaceous aerogel for enhanced photodegradation performance // *Journal of Molecular Liquids*. 2019. Vol. 292. Pp. 111476. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111476>.
75. Wei W., Hu H., Huang Z., Jiang Z., Lv X., Xie J., Kong L. BiPO<sub>4</sub> nanorods anchored in biomass-based carbonaceous aerogel skeleton: A 2D-3D heterojunction composite as an energy-efficient photocatalyst // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2019. Vol. 147. Pp. 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.02.012>.
76. Yu M., Li J., Wang L. Preparation and characterization of magnetic carbon aerogel from pyrolysis of sodium carboxymethyl cellulose aerogel crosslinked by iron trichloride // *Journal of Porous Materials*. 2016. Vol. 23, no. 4. Pp. 997–1003. <https://doi.org/10.1007/s10934-016-0157-4>.
77. Rasheed H.U., Lv X., Zhang S., Wei W., Xie J. Ternary MIL-100 (Fe)@ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CA magnetic nanophotocatalysts (MNPCs): Magnetically separable and Fenton-like degradation of tetracycline hydrochloride // *Advanced Powder Technology*. 2018. Vol. 29, no. 12. Pp. 3305–3314. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.09.011>.
78. Shanmugam P., Murthy A.P., Theerthagiri J., Wei W., Madhavan J., Kim H.-S., Maiyalagan T., Xie J. Robust bifunctional catalytic activities of N-doped carbon aerogel-nickel composites for electrocatalytic hydrogen evolution and hydrogenation of nitrocompounds // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, no. 26. Pp. 13334–13344. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.225>.
79. Shanmugam P., Wei W., Qian K., Jiang Z., Lu J., Xie J. Efficient removal of erichrome black T with biomass-derived magnetic carbonaceous aerogel sponge // *Materials Science and Engineering: B*. 2019. Vol. 248. Pp. 114387. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.114387>.
80. Gómez-Cápiro O., Hinkle A., Delgado A.M., Fernández C., Jiménez R., Arteaga-Pérez L.E. Carbon aerogel-supported nickel and iron for gasification gas cleaning. Part I: ammonia adsorption // *Catalysts*. 2018. Vol. 8, no. 9. Pp. 347. <https://doi.org/10.3390/catal8090347>.

81. Moreno-Castilla C., Carrasco-Marín F., Dawidziuk M.B. Carbon aerogel-supported Pt catalysts for the hydrogenolysis and isomerization of n-Butane: influence of the carbonization temperature of the support and Pt particle size // *Catalysts*. 2012. Vol. 2, no. 4. Pp. 422–433. <https://doi.org/10.3390/catal2040422>.
82. Guo X., Zhang Q., Li Q., Yu H., Liu Y. Composite aerogels of carbon nanocellulose fibers and mixed-valent manganese oxides as renewable supercapacitor electrodes // *Polymers*. 2019. Vol. 11, no. 1. 129. <https://doi.org/10.3390/polym11010129>.

Поступила в редакцию 4 декабря 2025 г.

После переработки 29 января 2026 г.

Принята к публикации 29 января 2026 г.

Kuznetsov B.N.<sup>1,2</sup>, Ovchinnikova T.G.<sup>1</sup>, Taran O.P.<sup>1,2</sup> CARBON GEL-BASED CARRIERS AND CATALYSTS

<sup>1</sup> Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS, Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS, st. Akademgorodok, 50/24, Krasnoyarsk, 660036, Russia, [bnk-icct@yandex.ru](mailto:bnk-icct@yandex.ru)

<sup>2</sup> Siberian Federal University, ave. Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041, Russia

New promising technologies for producing chemical products and biofuels from renewable raw materials-lignocellulosic biomass are based on catalytic processes. Most biomass conversion processes are carried out in aqueous and aqueous-organic medium, requiring the use of water-tolerant catalysts. These include carbon catalysts, particularly those based on biochars obtained by carbonizing plant materials. However, the disadvantages of biochar-based carbon materials, such as the presence of impurities, low strength, and difficulty in regulating their pore structure, stimulate research into producing synthetic carbon materials with the desired properties. These new materials include porous carbon gels produced by carbonization of organic monomers (aerogels, cryogels, and xerogels). Carbon gels can be obtained in various forms (granules, powders, films) with controlled micro-, meso-, and macroporous structures and densities. This review examines the properties of carbon gels obtained using synthetic and natural phenolic compounds, as well as solid acidic and metal-containing catalysts based on them.

Carbon gels obtained by carbonization of formaldehyde polycondensation products with synthetic phenolic compounds, such as resorcinol and phenol, have been studied in greatest detail. In recent years, research into the synthesis of carbon gels based on natural polyphenolic substances – tannins and lignin – has been actively developing. The use of wood lignin and bark tannins reduces the cost of the resulting gels and improves the environmental safety of their production. By varying the nature of coniferous polyphenols and crosslinking agents, as well as synthesis conditions, a range of porous carbon gels has been obtained, differing in density, porosity, specific surface area, and micro-meso-macropore ratio.

To date, various methods for synthesizing metal-containing carbon gels based on synthetic precursors, primarily resorcinol and formaldehyde, have been proposed and described. Three main methods are used to incorporate metals into the carbon framework: depositing a metal compound on an organic or carbon gel; dissolving the metal compound in the mixture used to synthesize the organic gel; and adding a compound with metal ion binding sites to the initial mixture or organic gel.

The resulting metal-containing carbon gels are increasingly used in a variety of catalytic processes: hydrogenation, isomerization, hydrogenolysis, electrochemical oxygen reduction, photodegradation of dyes, and others. However, there is not enough data in the literature on the use of such catalysts in conversion of biomass and its components. There is also no data on the synthesis of metal-containing carbon catalysts based on plant-derived polyphenols-tannins and lignin. It can be expected that such catalysts will be in demand in many processes of converting biomass into valuable chemical products.

**Keywords:** carbon gels, synthesis, structure, properties, precursors, tannins, lignin, metal-containing catalysts.

---

**For citing:** Kuznetsov B.N., Ovchinnikova T.G., Taran O.P. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 1, pp. 106–122. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260118320>.

---

## References

1. Lam E., Luong J.H. *ACS catalysis*, 2014, vol. 4, no. 10, pp. 3393–3410. <https://doi.org/10.1021/cs5008393>.
2. Al-Muhtaseb S.A., Ritter J.A. *Advanced materials*, 2003, vol. 15, no. 2, pp. 101–114. <https://doi.org/10.1002/adma.200390020>.
3. Biener J., Stadermann M., Suss M., Worsley M.A., Biener M.M., Rose K.A., Baumann T.F. *Energy & Environmental Science*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 656–667. <https://doi.org/10.1039/C0EE00627K>.
4. ElKhatat A.M., Al-Muhtaseb S.A. *Advanced materials*, 2011, vol. 23, no. 26, pp. 2887–2903. <https://doi.org/10.1002/adma.201100283>.
5. Li F., Xie L., Sun G., Kong Q., Su F., Cao Y., Wei J., Ahmad A., Guo X., Chen C.-M. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2019, vol. 279, pp. 293–315. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.12.007>.
6. Moreno-Castilla C., Maldonado-Hódar F. *Carbon*, 2005, vol. 43, no. 3, pp. 455–465. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.10.022>.

7. Moreno-Castilla C. *Carbon materials for catalysis*, 2008, pp. 373–399.
8. Gan G., Li X., Fan S., Wang L., Qin M., Yin Z., Chen G. *European journal of inorganic chemistry*, 2019, vol. 2019, no. 27, pp. 3126–3141. <https://doi.org/10.1002/ejic.201801512>.
9. Sam D.K., Sam E.K., Durairaj A., Lv X., Zhou Z., Liu J. *Carbohydrate research*, 2020, vol. 491, 107986. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.107986>.
10. Long L.-Y., Weng Y.-X., Wang Y.-Z. *Polymers*, 2018, vol. 10, no. 6, 623. <https://doi.org/10.3390/polym10060623>.
11. Kuznetsov B.N., Vasilyeva N.Y., Mikova N.M., Zhizhaev A.M. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 57–68. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0271>.
12. Zhang T., Yuan D., Guo Q., Qiu F., Yang D., Ou Z. *Food and Bioproducts Processing*, 2019, vol. 114, pp. 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.12.007>.
13. Peng H., Wu J., Wang Y., Wang H., Liu Z., Shi Y., Guo X. *Applied Physics A*, 2016, vol. 122, no. 5, 516. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0049-0>.
14. Grischekko L., Amaral-Labat G., Szczurek A., Fierro V., Kuznetsov B., Pizzi A., Celzard A. *Industrial Crops and Products*, 2013, vol. 41, pp. 347–355. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.052>.
15. Mikova N., Skvortsova G., Ivanov I., Levdanskiy V., Kuznetsov B. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 368–380. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0033>. (in Russ.).
16. Yang B.S., Kang K.-Y., Jeong M.-J. *Journal of the Korean Physical Society*, 2017, vol. 71, no. 8, pp. 478–482. <https://doi.org/10.3938/jkps.71.478>.
17. Xu J., Zhou X., Chen M., Shi S., Cao Y. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, vol. 265, pp. 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.02.024>.
18. Szczurek A., Amaral-Labat G., Fierro V., Pizzi A., Celzard A. *Carbon*, 2011, vol. 49, no. 8, pp. 2785–2794. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.03.005>.
19. Mikova N., Levdanskiy V., Skvortsova G., Zhizhaev A., Lutoshkin M., Chesnokov N., Kuznetsov B. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 1565–1573. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00561-8>.
20. Amaral-Labat G., Grischekko L., Fierro V., Kuznetsov B., Pizzi A., Celzard A. *Biomass and bioenergy*, 2013, vol. 56, pp. 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.06.001>.
21. Szczurek A., Amaral-Labat G., Fierro V., Pizzi A., Celzard A. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2013, vol. 416, 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/416/1/012022>.
22. Yue X., Zhang T., Yang D., Qiu F., Li Z. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 199, pp. 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.181>.
23. Jing Z., Ding J., Zhang T., Yang D., Qiu F., Chen Q., Xu J. *Food and Bioproducts Processing*, 2019, vol. 115, pp. 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.03.010>.
24. Vazhayal L., Wilson P., Prabhakaran K. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 381, 122628. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122628>.
25. Scherdel C., Reichenauer G. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2009, vol. 126, no. 1-2, pp. 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.05.033>.
26. Wu D., Fu R., Sun Z., Yu Z. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2005, vol. 351, no. 10-11, pp. 915–921. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2005.02.008>.
27. Grischekko L.I., Amaral-Labat G.I., Szczurek A., Fierro V., Kuznetsov B.N., Celzard A. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2013, vol. 168, pp. 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.09.024>.
28. Salinas-Torres D., Léonard A.F., Stergiopoulos V., Busby Y., Pireaux J.-J., Job N. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, vol. 256, pp. 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.08.004>.
29. Zhu Y., Hu H., Li W.-C., Zhang X. *Journal of Power Sources*, 2006, vol. 162, no. 1, pp. 738–742. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.06.049>.
30. Job N., Théry A., Pirard R., Marien J., Kocon L., Rouzaud J.-N., Béguin F., Pirard J.-P. *Carbon*, 2005, vol. 43, no. 12, pp. 2481–2494. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.04.031>.
31. Liu N., Zhang S., Fu R., Dresselhaus M.S., Dresselhaus G. *Carbon*, 2006, vol. 44, no. 12, pp. 2430–2436. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.04.032>.
32. Yamamoto T., Nishimura T., Suzuki T., Tamon H. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2001, vol. 288, no. 1-3, pp. 46–55. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(01\)00619-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(01)00619-6).
33. Zainol M.M., Amin N.A.S., Asmadi M. *Bioresource technology*, 2015, vol. 190, pp. 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.067>.
34. Robertson C., Mokaya R. *Microporous and mesoporous materials*, 2013, vol. 179, pp. 151–156. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2013.05.025>.
35. Hanzawa Y., Hatori H., Yoshizawa N., Yamada Y. *Carbon*, 2002, vol. 40, no. 4, pp. 575–581. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(01\)00150-6](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00150-6).
36. Zubizarreta L., Arenillas A., Pirard J.-P., Pis J.J., Job N. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2008, vol. 115, no. 3, pp. 480–490. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2008.02.023>.
37. Yu M., Li J., Wang L. *Chemical engineering journal*, 2017, vol. 310, pp. 300–306. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.121>.
38. Aegerter M.A., Leventis N., Koebel M. *Aerogels Handbook*. New York, 2011.
39. Rey-Raap N., Szczurek A., Fierro V., Celzard A., Menéndez J.A., Arenillas A. *Industrial Crops and Products*, 2016, vol. 82, pp. 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.001>.

40. Pizzi A. *Journal of Renewable Materials*, 2019, vol. 7, no. 5, pp. 474–489. <https://doi.org/10.32604/jrm.2019.06511>.
41. Grishechko L., Amaral-Labat G., Fierro V., Szcurek A., Kuznetsov B., Celzard A. *RSC Advances*, 2016, vol. 6, no. 70, pp. 65698–65708. <https://doi.org/10.1039/C6RA09462G>.
42. Braghiroli F., Fierro V., Izquierdo M., Parmentier J., Pizzi A., Celzard A. *Carbon*, 2012, vol. 50, no. 15, pp. 5411–5420. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.07.027>.
43. Mikova N.M., Ivanov I.P., Zhizhayev A.M., Kuznetsov B.N. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2025, no. 3, pp. 101–113. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250316854>. (in Russ.).
44. Mikova N., Ivanov I., Fetisova O.Y., Kazachenko A., Kuznetsov B. *Bioresource Technology Reports*, 2023, vol. 22, 101454. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101454>.
45. Mikova N., Ivanov I., Zhizhayev A., Tsyganova S., Kuznetsov B. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2022, vol. 95, no. 3, p. 344. <https://doi.org/10.31857/S0044461822030069>. (in Russ.).
46. Mikova N., Zhizhayev A., Ivanov I., Lutoshkin M., Kuznetsov B. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya*, 2020, vol. 13, no. 1, pp. 109–121. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0160>. (in Russ.).
47. Mikova N., Ivanov I., Levdanskiy V., Kuznetsov B. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 175–188. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0173>. (in Russ.).
48. Mikova N., Ivanov I., Zhizhayev A., Kuznetsova S., Kuznetsov B. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya*, 2023, vol. 16, no. 1, pp. 96–106. (in Russ.).
49. Van Pelt A.H., Simakova O.A., Schimming S.M., Ewbank J.L., Foo G.S., Pidko E.A., Hensen E.J., Sievers C. *Carbon*, 2014, vol. 77, pp. 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.05.015>.
50. Okamura M., Takagaki A., Toda M., Kondo J.N., Domen K., Tatsumi T., Hara M., Hayashi S. *Chemistry of Materials*, 2006, vol. 18, no. 13, pp. 3039–3045. <https://doi.org/10.1021/cm0605623>.
51. Zhang W., Tao H., Zhang B., Ren J., Lu G., Wang Y. *Carbon*, 2011, vol. 49, no. 6, pp. 1811–1820. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.12.050>.
52. Dora S., Bhaskar T., Singh R., Naik D.V., Adhikari D.K. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 120, pp. 318–321. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.036>.
53. Pang J., Wang A., Zheng M., Zhang T. *Chemical Communications*, 2010, vol. 46, no. 37, pp. 6935–6937. <https://doi.org/10.1039/C0CC02014A>.
54. Cotet L., Gich M., Roig A., Popescu I., Cosoveanu V., Molins E., Danciu V. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, vol. 352, no. 26-27, pp. 2772–2777. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.03.039>.
55. Ribeiro A.P.d.C., Martins L.M.D.R.d.S., Carabineiro S.A.C., Figueiredo J.L., Pombeiro A.J.L. *Molecules*, 2017, vol. 22, no. 4, 603. <https://doi.org/10.3390/molecules22040603>.
56. Morales-Torres S., Maldonado-Hódar F., Pérez-Cadenas A., Carrasco-Marin F. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, vol. 183, no. 1-3, pp. 814–822. <https://doi.org/10.3390/10.1016/j.jhazmat.2010.07.100>.
57. Moreno-Castilla C., Maldonado-Hódar F., Pérez-Cadenas A. *Langmuir*, 2003, vol. 19, no. 14, pp. 5650–5655. <https://doi.org/10.1021/la034536k>.
58. Saquing C.D., Kang D., Aindow M., Erkey C. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2005, vol. 80, no. 1-3, pp. 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2004.11.019>.
59. Zhang Y., Kang D., Aindow M., Erkey C. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2005, vol. 109, no. 7, pp. 2617–2624. <https://doi.org/10.1021/jp0467595>.
60. Zhang S., Fu R., Wu D., Xu W., Ye Q., Chen Z. *Carbon*, 2004, vol. 42, no. 15, pp. 3209–3216. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.08.004>.
61. Jirglová H., Maldonado-Hódar F.J. *Langmuir*, 2010, vol. 26, no. 20, pp. 16103–16109. <https://doi.org/10.1021/la102499h>.
62. Maldonado-Hódar F.J., Jirglová H., Pérez-Cadenas A.F., Morales-Torres S. *Carbon*, 2013, vol. 51, pp. 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.08.046>.
63. Zubiaur A., Job N. *Applied Catalysis B: Environmental.*, 2018, vol. 225, pp. 364–378. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.11.059>.
64. Lee J.-H., Park S.-J. *Carbon*, 2020, vol. 163, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.02.073>.
65. Yu S., Song S., Li R., Fang B. *Nanoscale*, 2020, vol. 12, no. 38, pp. 19536–19556. <https://doi.org/10.1039/D0NR05050D>.
66. Shaari N., Kamarudin S.K. *International Journal of Energy Research*, 2019, vol. 43, no. 7, pp. 2447–2467. <https://doi.org/10.1002/er.4423>.
67. Hou X., Zhao J., Liu J., Han Y., Pei Y., Ren J. *New Journal of Chemistry*, 2019, vol. 43, no. 24, pp. 9430–9438. <https://doi.org/10.1039/C9NJ01434A>.
68. Xiao X., Xu Y., Lv X., Xie J., Liu J., Yu C. *Journal of colloid and interface science*, 2019, vol. 545, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.03.005>.
69. Kim G.-P., Lee M., Lee Y.J., Bae S., Song H.D., Song I.K., Yi J. *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 193, pp. 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.02.064>.
70. Li C., Sun F., Lin Y. *Journal of Power Sources*, 2018, vol. 384, pp. 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.01.020>.
71. Sarapuu A., Samolberg L., Kreek K., Koel M., Matisen L., Tammeveski K. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2015, vol. 746, pp. 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.03.021>.

72. Sarapuu A., Kreek K., Kisand K., Kook M., Uibu M., Koel M., Tammeveski K. *Electrochimica Acta*, 2017, vol. 230, pp. 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.01.157>.
73. Zhu L., Jiang H., Ran W., You L., Yao S., Shen X., Tu F. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 489, pp. 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.333>.
74. Hu H., Wei W., Jiang Z., Sun W., Lv X., Xie J. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, vol. 292, 111476. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111476>.
75. Wei W., Hu H., Huang Z., Jiang Z., Lv X., Xie J., Kong L. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2019, vol. 147, pp. 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.02.012>.
76. Yu M., Li J., Wang L. *Journal of Porous Materials*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 997–1003. <https://doi.org/10.1007/s10934-016-0157-4>.
77. Rasheed H.U., Lv X., Zhang S., Wei W., Xie J. *Advanced Powder Technology*, 2018, vol. 29, no. 12, pp. 3305–3314. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.09.011>.
78. Shanmugam P., Murthy A.P., Theerthagiri J., Wei W., Madhavan J., Kim H.-S., Maiyalagan T., Xie J. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, no. 26, pp. 13334–13344. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.225>.
79. Shanmugam P., Wei W., Qian K., Jiang Z., Lu J., Xie J. *Materials Science and Engineering: B*, 2019, vol. 248, 114387. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.114387>.
80. Gómez-Cápiro O., Hinkle A., Delgado A.M., Fernández C., Jiménez R., Arteaga-Pérez L.E. *Catalysts*, 2018, vol. 8, no. 9, 347. <https://doi.org/10.3390/catal8090347>.
81. Moreno-Castilla C., Carrasco-Marín F., Dawidziuk M.B. *Catalysts*, 2012, vol. 2, no. 4, pp. 422–433. <https://doi.org/10.3390/catal2040422>.
82. Guo X., Zhang Q., Li Q., Yu H., Liu Y. *Polymers*, 2019, vol. 11, no. 1, 129. <https://doi.org/10.3390/polym11010129>.

Received December 4, 2025

Revised January 29, 2026

Accepted January 29, 2026

#### Сведения об авторах

Кузнецов Борис Николаевич – доктор химических наук, профессор, руководитель научного направления кафедры органической и аналитической химии, [bnk-icct@yandex.ru](mailto:bnk-icct@yandex.ru)

Овчинникова Татьяна Григорьевна – младший научный сотрудник лаборатории химии природного органического сырья, [ovchinnikova.tg@icct.krasn.ru](mailto:ovchinnikova.tg@icct.krasn.ru)

Таран Оксана Павловна – доктор химических наук, профессор, заведующая лабораторией каталитических превращений возобновляемых ресурсов, заведующая кафедрой органической и аналитической химии, [taran.op@icct.krasn.ru](mailto:taran.op@icct.krasn.ru)

#### Information about authors

Kuznetsov Boris Nikolaevich – Professor, Head of Scientific Direction, Professor at the Department of Organic and Analytical Chemistry, [bnk-icct@yandex.ru](mailto:bnk-icct@yandex.ru)

Ovchinnikova Tatyana Grigoryevna – Junior Researcher at the Laboratory of Chemistry of Natural Organic Raw Materials, [ovchinnikova.tg@icct.krasn.ru](mailto:ovchinnikova.tg@icct.krasn.ru)

Taran Oksana Pavlovna – Professor, Head of the Laboratory of Catalytic Conversion of Renewable Resources, Head of the Department of Organic and Analytical Chemistry, [taran.op@icct.krasn.ru](mailto:taran.op@icct.krasn.ru)