

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-2-47-56>

УДК 621.352, 544.6.018.47, 621.3.035.221.6-404.2, 541.64

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ ГЕЛЬ-ПОЛИМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А. В. Ерсайнова^{1*}, С. Р. Ракишева^{1,2}, А. М. Жумабаев^{1,2}, Н. Б. Есенгалиева¹, Т. Қойшыбайқызы^{1,2}, А. А. Машенцева^{1,2}

¹ Институт ядерной физики Агентства Республики Казахстан по атомной энергии, Алматы, Казахстан

² Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

* E-mail для контактов: av_yersainova@mail.ru

Биоразлагаемые гель-полимерные электролиты (ГПЭ) являются перспективной альтернативой жидким электролитам и синтетическим сепараторам в твердотельных суперконденсаторах (ТСК) для носимой электроники, биомедицинских устройств и автономных сенсоров. Они обеспечивают повышенную безопасность, предотвращают утечки электролита, повышают гибкость устройств и снижают экологическую нагрузку. В обзоре систематизированы современные подходы к созданию биоразлагаемых ГПЭ на основе хитозана, альгината, желатина, целлюлозы и ее производных, крахмала, лигнина, полимолочной кислоты и других полимеров. Рассмотрены методы модификации (сшивки, функционализация, композитирование, введение нанонаполнителей) и механизмы ионного транспорта в гелевых матрицах. Особое внимание уделено влиянию электролита на ионную проводимость, эквивалентное последовательное сопротивление (ESR), рабочее напряжение и циклическую стабильность. Обсуждены основные ограничения биоразлагаемых ГПЭ и перспективы разработки «зеленых» твердотельных энергонакопительных устройств.

Ключевые слова: твердотельные суперконденсаторы; гель-полимерные электролиты; биоразлагаемые полимеры; ионная проводимость; эквивалентное последовательное сопротивление; гибкая электроника; экологически устойчивые материалы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Рост интереса к экологически устойчивым источникам и системам накопления энергии обусловлен активным развитием носимой электроники, биомедицинских устройств и одноразовых автономных сенсоров, требующих безопасных, компактных и экологически приемлемых источников питания [1-4]. В этих условиях особое внимание уделяется устройствам накопления энергии, сочетающим высокую удельную мощность, быструю зарядку/разрядку и длительный ресурс, что критично для автономных и гибких электронных систем.

Твердотельные суперконденсаторы (ТСК) выгодно отличаются от традиционных аккумуляторов высокой эксплуатационной безопасностью, механической стабильностью и длительным сроком службы [5,6]. Однако их широкое внедрение по-прежнему ограничено применением синтетических полимерных сепараторов и жидких электролитов, не соответствующих современным требованиям экологичности и биосовместимости [5-7]. Использование жидких электролитов может сопровождаться риском утечек, а также усложняет реализацию гибких устройств. При этом традиционные синтетические мембраны характеризуются низкой биоразлагаемостью и формируют устойчивый экологический след [5,7]. В этом контексте биоразлагаемые мембранные и гель-полимерные электролиты (ГПЭ) на основе природных полимеров рассматриваются как ключевой компонент нового поколения ТСК,

позволяющий одновременно снизить экологическую нагрузку и расширить функциональные возможности энергонакопительных устройств. Использование таких материалов обеспечивает эффективный ионный транспорт и стабильный контакт электрод/электролит, повышает гибкость и эксплуатационную безопасность устройств, а также снижает их экологический след за счет применения возобновляемого и биоразлагаемого сырья [8,9].

Особую актуальность в последние годы приобретают ГПЭ, сочетающие в себе функции электролита и сепаратора и обеспечивающие компромисс между высокой ионной проводимостью и механической устойчивостью [8,9]. В отличие от жидких систем, гелевые электролиты позволяют повысить герметичность и снизить вероятность деградации характеристик за счет утечек, сохраняя при этом достаточную подвижность ионов в электролитной фазе. Перспективность использования биоразлагаемых полимеров (например, хитозана, альгината, желатина, целлюлозных производных) обусловлена также возможностью функционализации полимерной матрицы и формирования устойчивых ионопроводящих сетей, что способствует улучшению рабочих характеристик твердотельных устройств [8,10].

Значение мембранных и ГПЭ в ТСК определяется их прямым влиянием на удельную мощность, эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) и стабильность при высоких токовых нагрузках [11,12].

Именно эти параметры в существенной степени задают энергоэффективность и долговечность устройства в режиме многократного циклирования, что является ключевым отличием суперконденсаторов от аккумуляторных источников энергии.

В данном обзоре рассматриваются современные достижения в области разработки, модификации и практического применения ГПЭ на основе биоразлагаемых полимеров для ТСК. Особый акцент сделан на хитозане благодаря его доступности, биоразлагаемости, пленкообразующей способности и наличию функциональных групп, обеспечивающих ионный транспорт и возможность модификации.

Быстрое накопление экспериментальных данных в этой области, особенно в части составов электролитных матриц, методов структурной и химической модификации, а также оптимизации интерфейса электрод/электролит, требует регулярной систематизации и обновления существующих подходов к проектированию подобных систем. Отдельный раздел посвящен анализу наиболее перспективных направлений применения биоразлагаемых ГПЭ в гибкой и носимой электронике, биомедицинских устройствах и экологически устойчивых автономных сенсорных системах, а также обсуждению ключевых ограничений и будущих тенденций развития данной области.

2. Роль гель-полимерных электролитов в твердотельных суперконденсаторах

В твердотельных суперконденсаторах ГПЭ выполняет функции ионопроводящей среды и разделительного слоя, обеспечивая перенос ионов между электродами, удержание электролитной фазы и стабильность устройства при деформациях [8,13]. Использование биоразлагаемых полимерных матриц позволяет рассматривать такие системы как перспективные для экологически ориентированных и потенциально биосовместимых энергонакопителей.

Ключевые свойства ГПЭ – ионная проводимость, степень набухания, пористость и механическая прочность – определяют ESR, динамику заряд–разрядных процессов и устойчивость интерфейса электрод–электролит. Наиболее исследованными матрицами являются хитозан, желатин и целлюлозные полимеры, содержащие полярные группы (–ОН, –NH₂, –COOH), а их функционализация (сшивки, введение ионных групп, композитирование) позволяет регулировать характеристики электролита [8,13–15]. На рисунке 1 представлены основные биоразлагаемые полимеры и природные источники, применяемые для формирования ГПЭ.

Выбор биоразлагаемой полимерной матрицы определяет структуру ионопроводящей сети ГПЭ и,

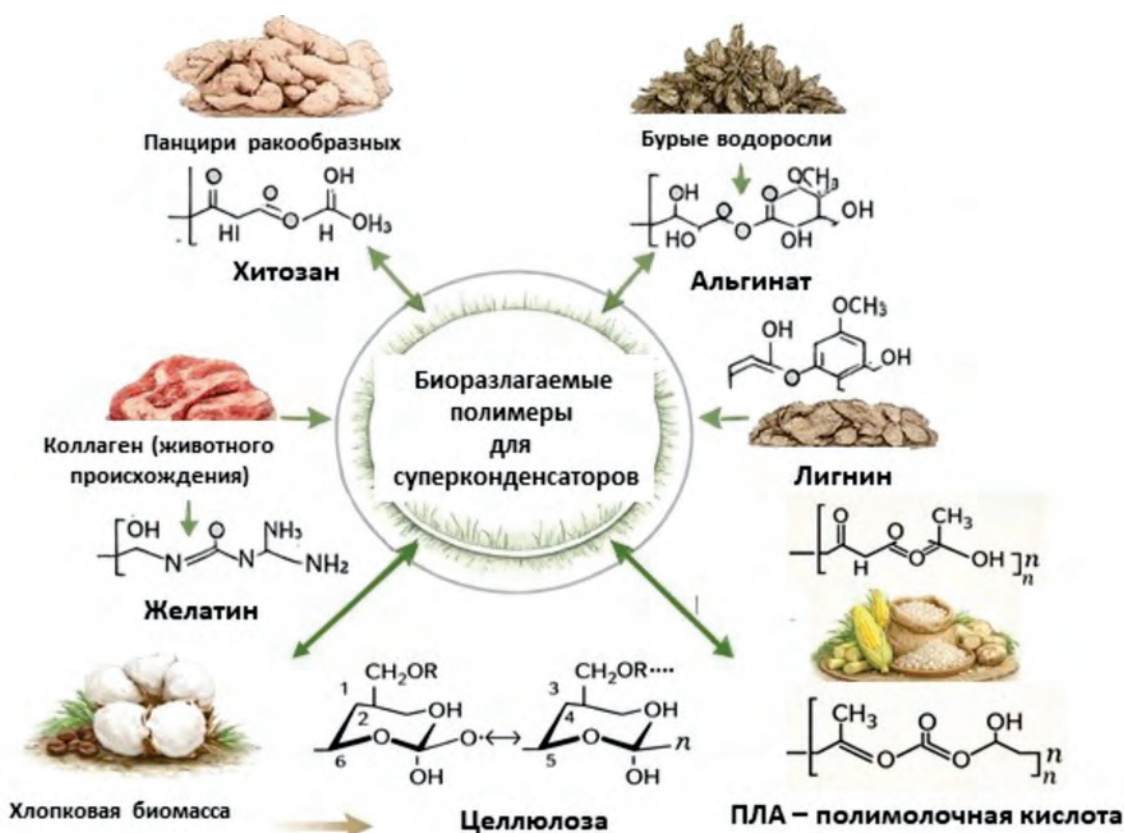


Рисунок 1 – Биоразлагаемые полимеры для суперконденсаторов

как следствие, параметры твердотельных суперконденсаторов: ионную проводимость, электрохимическое окно стабильности и ресурс при циклировании. Наиболее перспективные биополимеры включают полисахариды и белковые полимеры (целлюлоза, альгинаты, желатин, хитозан), а также биоразлагаемые полиэфиры (PLA), которые позволяют формировать электролиты с регулируемым сроком службы и экологическим профилем [16].

Целлюлоза и ее производные являются наиболее распространенными природными полимерами. Наноцеллюлоза и карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) часто используются как каркасные матрицы ГПЭ, обеспечивая механическую прочность и развитую водородно-связанную сеть, благоприятную для формирования ионопроводящих каналов. Целлюлозные матрицы особенно перспективны для гибких устройств благодаря комбинации прочности и стабильности структуры [17].

Желатин – белковый биополимер (производное коллагена), содержащий $-NH_2/-COOH$ группы, которые участвуют в комплексообразовании и стабилизации ионов в электролитной матрице, обеспечивая эластичность и хорошее межфазное сцепление. Желатиновые ГПЭ подходят для эластичных и «мягких» энергосистем, где важны деформируемость и долговечность [18].

Альгинаты – анионные полисахариды бурых водорослей с карбоксильными группами, обеспечивающими ионное сшивание и формирование гидрогелевой сети с выраженной гидрофильностью и высокой водоудерживающей способностью. Альгинат является перспективной основой для гидрогелевых и квазитвердотельных электролитов благодаря своей способности поддерживать ионную проводимость, зависящую от уровня влагосодержания [14].

Лигнин — ароматический биополимер из растительной биомассы и побочный продукт биорефининга; рассматривается как функциональная добавка или матрица ГПЭ, способная улучшать механические свойства и формировать дополнительные центры взаимодействия за счет фенольных групп. Лигнин является перспективной основой для «зеленых» ГПЭ с усиленными механическими свойствами при сохранении высокой проводимости [19].

Полимолочная кислота (PLA) относится к биоразлагаемым полиэфирам, получаемым из биооснованных мономеров. PLA в системах ГПЭ применяется преимущественно в композитном дизайне, поскольку для повышения ионного транспорта требуется пластификация/смешение/введение наполнителей. PLA особенно перспективна для высоковольтных твердотельных устройств и архитектур с контролируемым жизненным циклом [20].

Хитозан является одним из наиболее распространенных природных биополимеров и занимает второе

место по распространенности после целлюлозы [21]. Его структура образована чередующимися звеньями N-ацетилглюкозамина и глюкозамина [22], а ключевым преимуществом является возобновляемость сырьевой базы, поскольку хитозан получают из биомассы, включая отходы морской промышленности и микроорганизмы [23]. Варьирование молекулярной массы и степени деацетилирования позволяет управлять физико-химическими свойствами материала и формировать различные морфологии — от плотных пленок до пористых и гелевых структур [24].

Растворимость и реологическое поведение хитозана определяются значением pH, природой растворителя и распределением функциональных групп вдоль полимерной цепи. На практике растворение чаще всего осуществляют в слабых органических кислотах, таких как уксусная кислота [4], однако показана возможность формирования стабильных водных систем при нейтральном pH в присутствии глицерол-2-фосфата [5,6]. При повышении температуры такие системы способны к обратимому гелеобразованию, что представляет особый интерес для получения гидрогелевых мембран.

По сравнению с хитином хитозан демонстрирует более выраженную способность к комплексообразованию, что связано с наличием свободных аминогрупп ($-NH_2$), равномерно распределенных вдоль основной цепи полимера [7]. Структурно хитозан представляет собой частично деацетилированный хитин — сополимер β -(1→4)-2-ацетамидо-D-глюкозы и β -(1→4)-2-амино-D-глюкозы [8]. Наличие гидроксильных и аминных групп играет ключевую роль в механизмах ионного транспорта, гидратации и взаимодействия с электролитами, напрямую влияя на ионную проводимость, электрохимическую стабильность и характеристики интерфейса электрод–электролит в твердотельных суперконденсаторах.

Для исследования структуры и свойств хитозана и его производных в литературе широко используются электронная микроскопия, спектроскопические, термические и рентгеноструктурные методы анализа, позволяющие комплексно оценивать морфологию, степень кристалличности, функциональный состав и стабильность материалов [7,9].

Таким образом, современные данные подтверждают, что выбор матрицы позволяет целенаправленно регулировать параметры биоразлагаемых ГПЭ: целлюлоза и желатин обеспечивают механическую стабильность и циклическую долговечность, альгинат формирует гидрогелевые сети с эффективным переносом ионов, лигнин повышает проводимость и устойчивость, а PLA открывает путь к расширенному электрохимическому окну. В контексте темы настоящего обзора («состояние и перспективы») дальнейшее развитие биоразлагаемых ГПЭ будет связано с композитным дизайном, оптимизацией межфазного

контакта и управлением компромиссом между биоразлагаемостью и электрохимической эффективностью

3. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ГПЭ

Электрохимические характеристики биоразлагаемых ГПЭ определяют эффективность и надежность твердотельных суперконденсаторов, включая ионную проводимость, электрохимическое окно стабильности, ESR и циклическую долговечность. Для систем на основе природных полимеров (хитозан, целлюлоза, желатин и их производные) ионная проводимость в гелевом/увлажненном состоянии обычно составляет 10^{-3} – 10^{-2} S·см⁻¹, что сопоставимо с синтетическими электролитами PVA/PEO [16]. Параметры ГПЭ оцениваются методами CV, GCD и EIS; импедансный анализ позволяет определить ESR, напрямую влияющее на удельную мощность. В литературе сообщается, что удельная емкость твердотельных суперконденсаторов с биоразлагаемыми ГПЭ достигает 100–300 F·г⁻¹ [17], а сохранение емкости составляет 80–95% после 10^3 – 10^4 циклов заряд–разряд при устойчивой работе устройства в условиях механических деформаций. Несмотря на то, что синтетические системы на основе PVA, PVDF и Nafion часто обеспечивают более высокую химическую стабильность, расширенное окно и более низкий ESR, биоразлагаемые ГПЭ выигрывают благодаря возобновляемости и функциональным группам, улучшающим ионный транспорт и межфазный контакт, а современные композитные подходы позволяют снижать компромисс между биоразлагаемостью и электрохимической эффективностью.

Сравнительные электрохимические параметры биоразлагаемых ГПЭ и пленочных электролитов обобщены в таблице 1. Представленные данные демонстрируют возможность достижения характеристик, близких к синтетическим аналогам, при повышении экологической устойчивости материалов.

4. Био-нанокомпозиты на основе хитина, хитозана и графена

Оксид графена (GO) представляет собой окисленную и гидрофильную модификацию графена, которая значительно расширяет функциональные возможности полимерных матриц [33]. Как графен, так и GO широко применяются в качестве нанонаполнителей при создании полимерных нанокомпозитов. Химическая модификация графеновых структур позволила получить материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками и высокой функциональностью [34]. Для равномерного распределения графена или GO в хитозановой матрице были разработаны различные подходы, основанные на формировании физических и химических связей между компонентами [35].

Хитозан относится к экологически безопасным, возобновляемым и экономически доступным материалам. Нанокомпозиты на его основе привлекают значительное внимание исследователей благодаря сочетанию высоких химических и физико-механических свойств [36]. Развитие нанотехнологий способствовало внедрению наночастиц как на поверхность хитозана, так и в объем полимерной матрицы. Наличие гидроксильных (–OH) и аминных (–NH₂) функци-

Таблица 1. Сравнительные электрохимические характеристики биоразлагаемых мембранных электролитов для твердотельных суперконденсаторов

Биоразлагаемый полимер (матрица)	Тип мембраны / электролита	Ионная проводимость, σ (S·см ⁻¹)	Электрохимическое окно, В	Циклическая стабильность	Источник
Хитозан	Пленка (мембранный электролит)	$\sim 10^{-4}$ – 10^{-3}	$\sim 1,0$ – $1,2$	>80% после 10^3 циклов	[10]
Хитозан + PVA	Гидрогель / гель-полимерный	$\sim 10^{-3}$	$\sim 1,2$ – $1,5$	>85% после 10^3 – 10^4 циклов	[25]
Хитозан / GO	Композитная пленка	$\sim 10^{-3}$ – 10^{-2}	$\sim 1,2$ – $1,6$	>90% после 10^3 – 10^4 циклов	[26]
Целлюлозные мембраны	Пленка	$\sim 10^{-4}$ – 10^{-3}	$\sim 1,0$ – $1,3$	>80% после 10^3 циклов	[27]
Биополимерные гидрогели	Гель	$\sim 10^{-3}$ – 10^{-2}	$\sim 1,5$ – $2,0$	>90% после 10^4 циклов	[28]
Альгинат	Твердый полимерный электролит / гелевый электролит	$\sim 3,31 \cdot 10^{-4}$ (при 20wt% LiTFSI)	$\sim 1,85$	>90% после 10^4 циклов	[29]
Желатин	Гидрогель-электролит	$\sim 10^{-3}$ – 10^{-1}	~ 1	>90% после 10^4 циклов	[30]
Целлюлоза / КМЦ	Пленка / мембранный электролит	$\sim 10^{-4}$ – 10^{-3}	$\sim 1,0$ – $1,3$	>80% после 10^3 циклов	[27]
Лигнин	Гидрогель / лигнин - содержащий гелевый электролит	$\sim 5,7 \cdot 10^{-2}$	$\sim 1,93$	97,5% после $5 \cdot 10^3$ циклов	[31]
PLA (полимолочная кислота)	Композитный гель - полимерный электролит на основе ПЛА	$(3,13\text{--}4,18) \cdot 10^{-3}$	$\sim 4,5$	>90% после 10^4 циклов	[32]

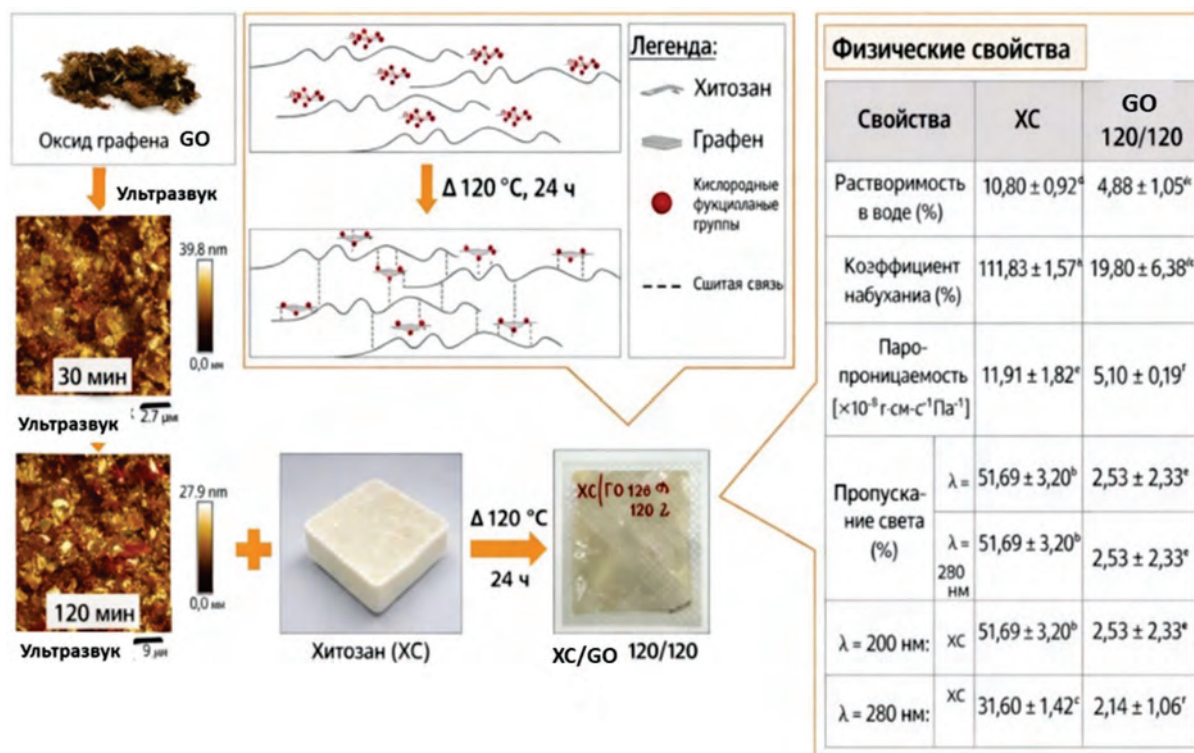


Рисунок 2. Схема формирования нанокompозитной пленки хитозан/GO (ультразвуковая обработка) [26]

ональных групп в структуре хитозана способствует образованию меж- и внутримолекулярных водородных связей [37]. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность введения как неорганических, так и органических наполнителей и расширяет потенциал функционализации материала [38].

В исследованиях нанокompозитов на основе хитозана и восстановленного оксида графена (rGO) показано, что rGO интегрируется в кристаллическую решетку хитозана, способствуя улучшению адсорбционных свойств и способности к взаимодействию с красителями [39]. При содержании rGO около 6 мас. наблюдалось увеличение прочности на разрыв, модуля Юнга, относительного удлинения при разрыве и электрической проводимости нанокompозитных пленок. Однако дальнейшее увеличение концентрации rGO до 7 мас.% приводило к агрегации наполнителя и снижению электропроводности материала [40].

На рисунке 2 представлена схема получения нанокompозита хитозан/GO с использованием ультразвуковой обработки продолжительностью 30 и 120 минут, а также результаты анализа морфологии поверхности методом атомно-силовой микроскопии (AFM). В ходе исследования была проведена оценка характера сшивки между хитозаном и оксидом графена, а также проанализированы физические свойства полученных нанокompозитных материалов [26].

В работе Cobos и соавторов были получены самонесущие нанокompозитные пленки на основе хитоза-

на и оксида графена [41]. В процессе синтеза GO равномерно распределялся в хитозановой матрице за счет образования амидных связей между карбоксильными группами оксида графена и аминогруппами хитозана. По сравнению с чистым хитозаном, температура стеклования нанокompозита хитозан–графен увеличилась с 118 до 158 °C [42]. Кроме того, для синтезированного нанокompозита отмечен существенный рост механических характеристик: прочность на растяжение и модуль Юнга возрастали в 2,5 и 4,6 раза соответственно [43].

В более позднем исследовании Zhang и соавт. синтезировали функционализированный оксид графена (fGO) путем комбинирования хитозана с ионной жидкостью для применения в электрохимическом сенсоре, представленном на рисунке 3. Разработанный сенсор продемонстрировал высокую чувствительность и был успешно использован для определения амаранта в коммерческих напитках, показав высокую эффективность аналитических характеристик [44].

5. Биodeградация и экологическая устойчивость

Одним из ключевых преимуществ биоразлагаемых ГПЭ является их способность к разложению в природных и биологических средах. В отличие от традиционных синтетических электролитных систем и полимерных сепараторов, биоразлагаемые ГПЭ могут деградировать без образования стойких токсичных продуктов, что делает их перспективными

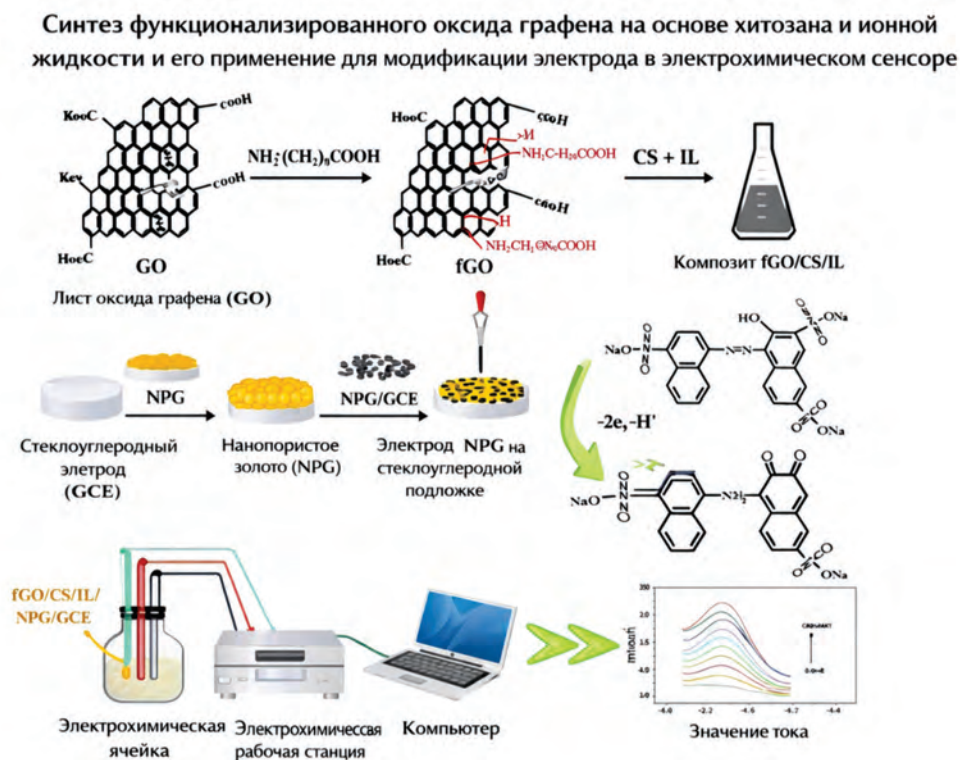


Рисунок 3. Схема электрохимического сенсора на основе нанокompозита GO/хитозан/ионная жидкость [44]

для временных устройств, одноразовых автономных сенсоров и имплантируемых энергетических систем [45–47].

При этом принципиально важно соблюдать баланс между скоростью биodeградации и эксплуатационной стабильностью материала, поскольку преждевременное разрушение полимерной матрицы может привести к ухудшению ионного транспорта, росту ESR и снижению эффективности энергонакопителя [46,48].

С точки зрения механизмов разложения биоразлагаемых ГПЭ на основе природных полимеров ключевую роль играют процессы гидролиза и ферментативной деградации, интенсивность которых определяется химической природой полимера, степенью сшивки и доступностью воды [48–50]. В водных и биологических средах гидролитическое расщепление гликозидных или амидных связей приводит к снижению молекулярной массы материала, тогда как ферментативные процессы, инициируемые микроорганизмами, способны существенно ускорить деградацию полимерной сети [49,50]. Существенное влияние оказывает также pH среды, определяющий степень ионизации функциональных групп и, соответственно, скорость разрушения структуры электролита [10,51]. Согласно данным литературы, временной масштаб биodeградации биополимерных ГПЭ для энергетических устройств обычно составляет от нескольких

недель до нескольких месяцев, что позволяет адаптировать срок службы материала под конкретные задачи — от временных сенсорных систем до имплантируемых устройств [45,47,52]. Таким образом, оптимизация биodeградации при одновременном сохранении электрохимической и механической стабильности является важнейшей задачей при проектировании биоразлагаемых гель-полимерных электролитов для ТСК [10,46,52].

6. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Несмотря на значительный прогресс в области ГПЭ для ТСК, их практическое применение по-прежнему сопровождается рядом ограничений. К ключевым проблемам относятся сравнительно более низкая ионная проводимость по сравнению с синтетическими полимерными электролитами, ограниченное электрохимическое окно стабильности, а также необходимость повышения механической прочности и долговечности при сохранении способности к контролируемой биodeградации [10,16,53]. Дополнительными вызовами остаются чувствительность биополимерных ГПЭ к условиям окружающей среды (влажность, pH, температура) и отсутствие унифицированных методик оценки электрохимических и деградационных характеристик, что затрудняет корректное сравнение данных различных исследований [51,53–56].

Перспективными направлениями развития являются создание композитных гель-полимерных электролитов, основанных на сочетании природных полимеров с функциональными наполнителями (оксид графена, углеродные нанотрубки и др.), что позволяет повысить ионную проводимость, снизить эквивалентное последовательное сопротивление и расширить рабочие параметры электролита [54,55,57]. Существенный потенциал также демонстрируют структурированные электролитные матрицы (волокнистые, иерархически пористые, трековые), обеспечивающие направленный транспорт ионов и более стабильное формирование интерфейса электрод–электролит [51,53,55]. В совокупности данные подходы позволяют частично нивелировать компромисс между биоразлагаемостью и электрохимической эффективностью, который остается одной из ключевых научных и инженерных задач [16,54].

Таким образом, дальнейшее развитие биоразлагаемых ГПЭ для твердотельных суперконденсаторов будет определяться успешной оптимизацией баланса между ионной проводимостью, электрохимической и механической стабильностью, а также управляемым сроком службы материала. Эти аспекты формируют основу для обобщающих выводов и определения направлений дальнейших исследований, рассматриваемых в заключительном разделе настоящего обзора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ГПЭ представляют собой одно из наиболее перспективных направлений развития твердотельных суперконденсаторов, ориентированных на экологически устойчивые, гибкие и потенциально биосовместимые энергетические системы. Проведенный обзор показывает, что ГПЭ на основе природных полимеров – хитозана, целлюлозы, желатина и их производных – способны обеспечивать ионную проводимость, электрохимическую стабильность и механическую надежность, сопоставимые с характеристиками традиционных синтетических электролитных систем. Наличие полярных функциональных групп, а также возможность химической и структурной модификации биополимерной матрицы позволяют эффективно управлять транспортом ионов, формированием интерфейса электрод–электролит и эквивалентным последовательным сопротивлением устройства.

В то же время сохраняются нерешенные задачи, связанные с ограниченным электрохимическим окном стабильности, чувствительностью биополимерных ГПЭ к условиям эксплуатации (влажность, pH, температура), а также необходимостью оптимального баланса между скоростью биodeградации и долговечностью энергонакопителя. Современные подходы, основанные на создании композитных гель-полимерных электролитов, введении функциональных наполните-

лей и формировании структурированных электролитных матриц, демонстрируют значительный потенциал для преодоления указанных ограничений и повышения эксплуатационных характеристик ТС.

В перспективе дальнейшее развитие биоразлагаемых ГПЭ будет определяться не только оптимизацией их электрохимических и механических свойств, но и переходом к масштабируемым и воспроизводимым технологиям получения, а также разработкой унифицированных методик оценки биоразлагаемости, деградации и надежности. Реализация данных направлений может привести к формированию нового класса твердотельных энергонакопительных устройств для носимой, имплантируемой и временной электроники, где экологическая безопасность и биосовместимость становятся сопоставимыми по значимости с энергетической эффективностью.

Работа выполнена в рамках проектов ГФ AP23487226 и ПЦФ BR28713053, финансируемых Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Holla B. R., Kanthraj M., Vaishali N. & V.K.A. Greening Energy Storage: Harnessing Bio-Based Materials as Supercapacitor Membranes // Journal of the Indian Chemical Society. – 2025. – Vol. 102, № 9. – P. 101948.
2. Xu Z. et al. A biodegradable and flexible solid-state supercapacitor based on a natural polymer dual network hydrogel electrolyte // Journal of Materials Chemistry A. – 2025. – Vol. 13. – P. 34938–34947.
3. M. Basheer Ahamed C.M.H. Biodegradable Materials for Energy Storage Applications. – 2024.
4. Cheung, R.C.F.; Ng, T.B.; Wong, J.H.; Chan W.Y. Chitosan: An update on potential biomedical and pharmaceutical applications // Mar. Drugs. – 2015. – Vol. 13. – P. 5156–5186.
5. Choi, C.; Nam, J.P.; Nah J.W. Application of chitosan and chitosan derivatives as biomaterials // J. Ind. Eng. Chem. – 2016. – Vol. 33. – P. 1–10.
6. Zhang, L.; Zeng, Y.; Cheng Z. Removal of heavy metal ions using chitosan and modified chitosan: A review // J. Mol. Liq. – 2016. – Vol. 214. – P. 175–191.
7. Cavallaro, G.; Micciulla, S.; Chiappisi, L.; Lazzara G. Chitosan-based smart hybrid materials: A physico-chemical perspective // J. Mater. Chem. B. – 2021. – Vol. 9. – P. 594–611.
8. Karimi-Maleh, H.; Ayati, A.; Davoodi, R.; Tanhaei, B.; Karimi, F.; Malekmohammadi, S.; Orooji, Y.; Fu, L.; Sillanpää M. Recent advances in using of chitosan-based adsorbents for removal of pharmaceutical contaminants: A review // J. Clean. Prod. – 2021. – P. 125880.
9. Simsir, H.; Eltugral, N.; Karagoz S. Hydrothermal carbonization for the preparation of hydrochars from glucose, cellulose, chitin, chitosan and wood chips via low-temperature and their characterization // Bioresour. Technol. – 2017. – Vol. 246. – P. 82–87.

10. Ding J. et al. Recent Advances in Biopolymer-Based Hydrogel Electrolytes for Supercapacitors // *ACS Energy Letters*. – 2024. – Vol. 9, № 4. – P. 1803–1825.
11. Vicentini et al. How to Measure and Calculate Equivalent Series Resistance (ESR) of Supercapacitors // *Energies*. – 2019. – Vol. 24, № 8. – P. 1452.
12. Li et al. Studies on the equivalent serial resistance of carbon based supercapacitors // *Electrochimica Acta*. – 2015. – Vol. 174, № 20. – P. 596–600.
13. Shuaibu A.D. et al. Advancing gel polymer electrolytes for next-generation solid-state supercapacitors (Review). // *Journal of Energy Storage*. – 2025. – Vol. 107, № 30. – P. 114851.
14. Klobukoski V., Riegel-Vidotti I.C. V.M. Characterization of alginate hydrogel electrolytes // *Electrochimica Acta*. – 2023. – P. 143013.
15. Hou Z. et al. Sodium Alginate/Zwitterionic Polymer Gel Electrolyte for Integrated All-Solid-State Supercapacitors // *Carbon Neutrality / CNMA*. – 2024. – Vol. 10, № 2. – P. e202300422.
16. Jain A. et al. Biopolymer Derived Gel Polymer Electrolytes: Current Status and Future Perspectives // *Macromolecular Rapid Communications*. – 2025. – P. e00472.
17. Jain A. et al. Comparative Electrochemical Properties of various electrolyte compositions // *Macromolecular Rapid Communications*. – 2025. – P. 1832.
18. Tordi P. et al. Ionically Tunable Gel Electrolytes Based on Gelatin-Alginate Biopolymers for High-Performance Supercapacitors // *Small*. – 2025. – Vol. 21, № 33. – P. e2503937.
19. Li X.-Y. et al. Recent advances in lignin-based gel electrolytes for energy storage // *Applied Energy*. – 2025. – Vol. 401 Part B, № 15. – P. 126711.
20. Lu Y. et al. Solid-state supercapacitors with shape-moldable polymer gel electrolyte and graphene paste electrodes // *Electrochimica Acta*. – 2025. – Vol. 651, № 30. – P. 237569.
21. Wang, W.; Meng, Q.; Li, Q.; Liu, J.; Zhou, M.; Jin, Z.; Zhao K. Chitosan derivatives and their application in biomedicine // *Int. J. Mol. Sci*. – 2020. – Vol. 21. – P. 487.
22. Kumar, M.R.; Muzzarelli, R.; Muzzarelli, C.; Sashiwa, H.; Domb A.J. Chitosan chemistry and pharmaceutical perspectives // *Chem. Rev*. – 2004. – Vol. 104. – P. 6017–6084.
23. Shariatinia Z. Pharmaceutical applications of chitosan // *Adv. Colloid Interface Sci*. – 2019. – Vol. 263. – P. 131–194.
24. Sahariah, P.; Masson M. Antimicrobial chitosan and chitosan derivatives: A review of the structure—Activity relationship // *Biomacromolecules*. – 2017. – Vol. 18. – P. 3846–3868.
25. Samsudin A.S. et al. Alginate/PVA solid polymer blend electrolytes with LiTFSI for EDLC applications // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. – 2024. – Vol. 61, № 4. – P. 1341.
26. Han, C.P.; Zawawi, R.M.; ZA N.H. Effect of sonication time and heat treatment on the structural and physical properties of chitosan/graphene oxide nanocomposite films // *Food Packag. Shelf Life*. – 2021. – Vol. 28. – P. 100663.
27. Pour G.B., Fard H.N., Aval L.F. A Comparison of the Electrical Properties of Gel Polymer Electrolytes. – 2024. – Vol. 10, № 12. – P. 803.
28. Vieira D.F. et al. Conductivity study of a gelatin-based polymer electrolyte. // *Electrochimica Acta*. – 2007. – Vol. 53, № 4. – P. 1404–1408.
29. Samsudin A.S. et al. The ionic conductivity and electrochemical performance of Alginate-PVA based polymer electrolyte with Li⁺ charge carriers for supercapacitor // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. – 2024. – Vol. 967, № 15. – P. 118463.
30. Choudhury N.A., Sampath S. S.A.. Gelatin Hydrogel Electrolytes and Their Application to Electrochemical Supercapacitors // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2008. – Vol. 155, № 1. – P. A71–A81.
31. Gao C. et al. Double Crosslinked Lignin/Hydrogel Electrolyte with High Ion Conductivity and Super Ductility for High Voltage Window Supercapacitor // *SSRN*. – 2022.
32. Yang C. et al. Porosity Tunable Poly(Lactic Acid)-Based Composite Gel Polymer Electrolyte with High Electrolyte Uptake for Quasi-Solid-State Supercapacitors // *Polymers*. – 2022. – P. 191654.
33. Fan, H.; Wang, L.; Zhao, K.; Li, N.; Shi, Z.; Ge, Z.; Jin Z. Fabrication, mechanical properties, and biocompatibility of graphene reinforced chitosan composites // *Biomacromolecules*. – 2010. – Vol. 11. – P. 2345–2351.
34. Sayyar, S.; Murray, E.; Thompson, B.C.; Chung, J.; Officer, D.L.; Gambhir, S.; Spinks, G.M.; Wallace G.G. Processable conducting graphene/chitosan hydrogels for tissue engineering // *J. Mater. Chem. B*. – 2015. – Vol. 3. – P. 481–490.
35. Liu, B.; Lian, H.T.; Yin, J.F.; Sun X.Y. Dopamine molecularly imprinted electrochemical sensor based on graphene–Chitosan composite // *Electrochim. Acta*. – 2012. – Vol. 75. – P. 108–114.
36. Kim, D.S.; Dhand, V.; Rhee, K.Y.; Park S.J. Study on the effect of silanization and improvement in the tensile behavior of graphene-chitosan-composite // *Polymers*. – 2015. – Vol. 7. – P. 527–551.
37. Fan, L.; Luo, C.; Li, X.; Lu, F.; Qiu, H.; Sun M. Fabrication of novel magnetic chitosan grafted with graphene oxide to enhance adsorption properties for methyl blue // *J. Hazard. Mater*. – 2012. – Vol. 215. – P. 272–279.
38. Geng, L.; Lin, Y.; Chen, S.; Shi, S.; Cai, Y.; Li, L.; Peng X. Superior strength and toughness of graphene/chitosan fibers reinforced by interfacial complexation // *Compos. Sci. Technol*. – 2020. – Vol. 194. – P. 108174.
39. Terzopoulou, Z.; Kyzas, G.Z.; Bikiaris D.N. Recent advances in nanocomposite materials of graphene derivatives with polysaccharides // *Materials*. – 2015. – Vol. 8. – P. 652–683.
40. Layek, R.K.; Samanta, S.; Nandi A.K. Graphene sulphonic acid/chitosan nano biocomposites with tunable mechanical and conductivity properties // *Polymer*. – 2012. – Vol. 53. – P. 2265–2273.
41. Cobos, M.; González, B.; Fernández, M.J.; Fernández M.D. Study on the effect of graphene and glycerol plasticizer on the properties of chitosan-graphene nanocomposites via in situ green chemical reduction of graphene oxide // *Int. J. Biol. Macromol*. – 2018. – Vol. 114. – P. 599–613.
42. Kumar, S.; Wani, M.Y.; Koh, J.; Gil, J.M.; Sobral A.J. Carbon dioxide adsorption and cycloaddition reaction of epoxides using chitosan–graphene oxide nanocomposite as a catalyst // *J. Environ. Sci*. – 2018. – Vol. 69. – P. 77–84.

43. Huang, J.; Jacobsen, J.; Larsen, S.W.; Genina, N.; Van de Weert, M.; Müllertz, A.; Nielsen, H.M.; Mu H. Graphene oxide as a functional excipient in buccal films for delivery of clotrimazole: Effect of molecular interactions on drug release and antifungal activity in vitro // *Int. J. Pharm.* – 2020. – Vol. 589. – P. 119811.
44. Zhang, Q.; Cheng, W.; Wu, D.; Yang, Y.; Feng, X.; Gao, C.; Meng, L.; Shen, X.; Zhang, Y.; Tang X. An electrochemical method for determination of amaranth in drinks using functionalized graphene oxide/chitosan/ionic liquid nanocomposite supported nanoporous gold // *Food Chem.* – 2022. – Vol. 367. – P. 130727.
45. Li Dong, Liangjie Shan 1, Yafei Wang J.L. Biodegradable power sources for transient bioelectronics // *Supramolecular Materials.* – 2025. – Vol. 4. – P. 100082.
46. Wang E. et al. Symbiotic biodegradable flexible supercapacitor in vivo // *Device.* – 2025. – Vol. 3, № 6. – P. 100724.
47. Shunsuke Yamada. Recent Progress in Transient Energy Storage using Biodegradable Materials // *Advanced Energy and Sustainability research.* – 2023. – Vol. 4. – P. 2300083.
48. Jiansen Ding. Recent Advances in Biopolymer-Based Hydrogel Electrolytes for Flexible Supercapacitors // *ACS Energy Letters.* – 2024. – Vol. 9, № 7.
49. de Zoysa H.K.S. et al. Chapter 19 - Role of microbial enzymes in the degradation of plastics // *Bioremediation Approaches for Environmental Clean-up.* – 2025. – P. 299–322.
50. Beg M. et al. Biodegradable biopolymers for electrochemical energy storage devices in a circular economy // *RSC Sustainability.* – 2025. № 1.
51. Simin C. et al. Biodegradable composite polymer as advanced gel electrolyte for quasi-solid-state lithium-metal battery // *eScience.* – 2022. – Vol. 2, № 5. – P. 494–508.
52. Hassan M., Gondal M.A., Cevik E. B.A. Synthesis of a Molybdate-Chelated Biodegradable Gel Electrolyte for High Energy Density Supercapacitors // *ACS Applied Energy Materials.* – 2022. – Vol. 5, № 6. – P. 6833–6846.
53. Shuaibu A.D. et al. Advancing gel polymer electrolytes for next-generation solid-state supercapacitors: challenges and future directions // *Journal of Energy Storage.* – 2025.
54. Ding J. et al. Recent Advances in Biopolymer-Based Hydrogel Electrolytes for Energy Storage // *ACS Energy Letters.* – 2024. – Vol. 9, № 4.
55. Yang W. et al. Biopolymer-based gel electrolytes for electrochemical energy storage devices: Recent progress and perspectives // *Progress in Polymer Science.* – 2024.
56. Chen X. et al. Polymer Electrolytes for Supercapacitors // *Polymers.* – 2024.
57. Alva M.S. et al. Biopolymer-based gel electrolyte integrated with ionic liquid and carbon quantum dots for high-performance sustainable supercapacitors // *Materials Chemistry and Physics.* – 2026. – Vol. 350, № 15. – P. 131910.

BIODEGRADABLE GEL-POLYMER ELECTROLYTES FOR SOLID-STATE SUPERCAPACITORS: CURRENT STATUS AND PROSPECTS

A. V. Yersainova^{1*}, S. R. Rakisheva^{1,2}, A. M. Zhumabayev^{1,2}, N. B. Esengalieva^{1,2}, T. Koishybaikyzy^{1,2}, A. A. Mashentseva^{1,2}

¹ *The Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

² *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

E-mail for contacts: av_yersainova@mail.ru

Biodegradable gel-polymer electrolytes (GPEs) represent a promising alternative to liquid electrolytes and synthetic separators in solid-state supercapacitors for wearable electronics, biomedical devices, and autonomous sensors. They offer enhanced safety, prevent electrolyte leakage, increase device flexibility, and reduce environmental impact. This review systematizes current approaches to the development of biodegradable GPEs based on chitosan, alginate, gelatin, cellulose and its derivatives, starch, lignin, polylactic acid, and other polymers. Methods of modification (cross-linking, functionalization, compositing, incorporation of nanofillers) and mechanisms of ion transport in gel matrices are considered. Particular attention is paid to the influence of the electrolyte on ionic conductivity, equivalent series resistance (ESR), operating voltage, and cyclic stability. The main limitations of biodegradable GPEs and prospects for the development of “green solid-state energy storage devices are discussed.

Keywords: *solid-state supercapacitors; gel-polymer electrolytes; biopolymers; ionic conductivity; ESR; flexible electronics; environmentally sustainable materials.*

ҚАТТЫ КҮЙДЕГІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРЛАРҒА АРНАЛҒАН БИОЫДЫРАЙТЫН ГЕЛЬ-ПОЛИМЕРЛІ ЭЛЕКТРОЛИТТЕР: ҚАЗІРГІ ЖАЙ-КҮЙІ ЖӘНЕ ДАМУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

А. В. Ерсайнова^{1*}, С. Р. Ракишева^{1,2}, А. М. Жұмабаев^{1,2}, Н. Б. Есенғалиева¹, Т. Қойшыбайқызы^{1,2}, А. А. Машенцева^{1,2}

¹ *Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

² *Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан*

** Байланыс үшін E-mail: av_yersainova@mail.ru*

Биоыдырайтын гель-полимерлі электролиттер (ГПЭ) киілетін электроника, биомедициналық құрылғылар және автономды сенсорлар үшін арналған қатты күйдегі суперконденсаторларда сұйық электролиттер мен синтетикалық сепараторларға перспективалы балама. Олар қауіпсіздікті арттырады, электролиттің ағуын болдырмайды, құрылғылардың икемділігін жоғарылатады және қоршаған ортаға түсетін экологиялық жүктемені төмендетеді.

Шолуда хитозан, альгинат, желатин, целлюлоза және оның туындылары, крахмал, лигнин, полимол қышқылы және басқа да полимерлер негізінде биоыдырайтын ГПЭ әзірлеудің заманауи тәсілдері жүйеленген. Модификациялау әдістері (айқаспалы байланыстыру, функционалдандыру, композиттеу, нанотолтырғыштарды енгізу) және гельді матрицалардағы иондық тасымал механизмдері талданған.

Электролиттің иондық өткізгіштікке, эквивалентті тізбектік кедергіге (ESR), жұмыс кернеуіне және циклдік тұрақтылыққа әсеріне ерекше назар аударылған. Биоыдырайтын ГПЭ-нің негізгі шектеулері мен «жасыл» қатты күйдегі энергия жинақтау құрылғыларын әзірлеудің болашағы қарастырылады.

Түйін сөздер: қатты күйдегі суперконденсаторлар, гель-полимерлі электролиттер, биополимерлер, иондық өткізгіштік, эквивалентті тізбектік кедергі (ESR), икемді электроника, экологиялық орнықты материалдар.