

**Авторлар туралы мәліметтер:**

Кульжабаев Елдос Муратович\* – 8D08102 «Органикалық өсімшілік» білім беру бағдарламасының 2 курс докторанты, «С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Қазақстан Республикасы, 010000, Астана қ., Жеңіс даңғ., 62, тел.: 87014347171, e-mail: agro\_eldos82@mail.ru.

Курбанбаев Алмаз Измуратович – философия докторы, (PhD), Танаптық дақылдар агротехникасы және өсімдік шаруашылығын әртараптандыру зертханасының меңгерушісі, «А.И.Бареев атындағы АШФӨО» ЖШС, Қазақстан Республикасы, 021601, Ақмола облысы., Шортанды ауылы, А.И. Бареев көш., 15, 62, тел.: 87472250301, e-mail: almaskurbanbaev@mail.ru.

Кульжанова Салтанат Мукатаевна – география ғылымдарының кандидаты, аға менеджер, «Назарбаев Зияткерлік мектептері» дербес білім беру ұйымының Педагогикалық шеберлік орталығы, Қазақстан Республикасы, 010000, Астана қ., Хусейн бен Талал көш., 21, тел.: 87002523794, e-mail: bota\_madi@mail.ru.

Мұратұлы Оразхан – 7M08102 «Аготехнология» білім беру бағдарламасының 2 курс магистранты, «С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Қазақстан Республикасы, 010000, Астана қ., Жеңіс даңғ., 62, тел.: 87014347171, e-mail: agro\_eldos82@mail.ru.

Кульжабаев Елдос Муратович\* – докторант 2 курса образовательной программы 8D08102 – Органическое земледелие, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Республика Казахстан, 010000, г. Астана, проспект Победы, 62, тел.: 87014347171, e-mail: agro\_eldos82@mail.ru.

Курбанбаев Алмаз Измуратович – PhD, заведующий лабораторией агротехники полевых культур и диверсификации растениеводства, ТОО «Научно-производственный центр зернового хозяйства имени А.И. Бареева», Республика Казахстан, 021601, Ақмолинская область, Шортанды, п. Научный, ул. А.И. Бареева, 15, тел.: 87472250301, e-mail: almaskurbanbaev@mail.ru.

Кульжанова Салтанат Мукатаевна – кандидат географических наук, Центр педагогического мастерства автономной организации образования «Назарбаев Интеллектуальные школы», Республика Казахстан, 010000, г. Астана, ул. Хусейна бен Талала, 21, тел.: 87002523794, e-mail: bota\_madi@mail.ru.

Мұратұлы Оразхан – магистрант 2 курса образовательной программы 7M08102 – Аготехнология, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Республика Казахстан, 010000, г. Астана, проспект Победы, 62, тел.: 87014347171, e-mail: agro\_eldos82@mail.ru.

Kulzhabayev Yeldos Muratovich\* – 2nd year PhD student, “8D08102 – Organic farming” educational program, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University NCJSC, 62 Zhenis Ave., Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, tel.: 87014347171, e-mail: agro\_eldos82@mail.ru.

Kurbanbayev Almas Izmuratovich I. – PhD, Head of the Laboratory of Field Crop Agrotechnology and Crop Diversification, A.I.Barayev Research and Production Center for Grain Farming LLP, Republic of Kazakhstan, 021601, Akmola region, Shortandy district, Nauchy village, 15 A.I.Barayev Str., tel.: 87472250301, e-mail: almaskurbanbaev@mail.ru.

Kulzhanova Saltanat Mukatayevna – Candidate of Geographical Sciences, Center of Pedagogical Excellence, Autonomous Educational Organization “Nazarbayev Intellectual Schools”, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 21 Khussein bin Talal Str., tel.: 87002523794, e-mail: bota\_madi@mail.ru.

Muratuly Orazkhan – 2nd year Master’s student, “7M08102 – Agotechnology” educational program, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University NCJSC, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 62 Zhenis Ave., tel.: 87014347171, e-mail: agro\_eldos82@mail.ru.

MPHTI 68.75.27

УДК 631.459:631.432

<https://doi.org/10.52269/SKVC2621145>

**ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОГЕЛЕЙ КАК ЭЛЕМЕНТ ВЛАГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ В УСЛОВИЯХ ЗАСУШЛИВЫХ СТЕПЕЙ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Муханов Н.К.\* – PhD, ассоциированный профессор, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, Республика Казахстан.

Серекпаев Н.А. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ГНС ТОО «AgroInnova Consult», г. Астана, Республика Казахстан.

Ногаев А.А. – PhD, ассоциированный профессор, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, Республика Казахстан.

Джакупов Н.М. – докторант, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, Республика Казахстан.

Водный фактор является определяющим элементом устойчивости и продуктивности агроэкосистем засушливых и полусушливых степных регионов, где дефицит влаги выступает главным лимитирующим фактором развития сельскохозяйственных культур. Усиление климатической аридизации, рост среднегодовых температур и увеличение продолжительности засушливых периодов существенно снижают эффективность традиционных систем земледелия и обостряют проблему сохранения почвенной влаги. В этих условиях особый научный и практический интерес представляет применение суперабсорбирующих полимеров (гидрогелей), способных аккумулировать значительные объёмы воды и постепенно высвобождать её в корнеобитаемом слое почвы.

В данной обзорно-аналитической статье выполнен сравнительный анализ современных отечественных и зарубежных научных публикаций за 2015–2025 гг., посвящённых использованию гидрогелей в условиях засушливых степей. Рассмотрены механизмы их действия, влияние на вододерживающую способность почв, физико-гидрологические свойства, физиологическое состояние растений и урожайность сельскохозяйственных культур. Показано, что применение гидрогелей позволяет повысить содержание доступной влаги в почве на 15–40 % и увеличить урожайность в засушливые годы на 10–30 % по сравнению с контролем.

Проведено сопоставление эффективности гидрогелей с традиционными влагосберегающими агротехническими приёмами, такими как мульчирование и минимальная обработка почвы. Отмечены ограничения технологии, включая экономические и экологические аспекты. Обоснована целесообразность комплексного подхода и необходимость дальнейших исследований с учётом региональных почвенно-климатических условий.

**Ключевые слова:** гидрогели, суперабсорбирующие полимеры, водный режим почв, засушливые степи, сухостепное земледелие, урожайность сельскохозяйственных культур, агроэкологическая устойчивость.

#### ҚАҢ ДАЛАЛАР ЖАҒДАЙЫНДА ЫЛҒАЛ ҮНЕМДЕУ ТЕХНОЛОГИЯСЫНЫҢ ШАРАСЫ РЕТІНДЕ ГИДРОГЕЛЬДІ ҚОЛДАНУ: ЗАМАНАУИ ЗЕРТТЕУЛЕРГЕ АНАЛИТИКАЛЫҚ ШОЛУ

Мұханов Н.Қ.\* – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Серекпаев Н.А. – ауыл шаруашылығы ғылымдарының докторы, профессор, «AgroInnova Consalt» ЖШС Бас ғылыми қызметкері, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Ногаев А.А. – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Джакупов Н.М. – докторант, «С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Су факторы қуаң және жартылай қуаң дала аймақтарындағы агроэкожүйелердің тұрақтылығы мен өнімділігін айқындайтын негізгі элемент болып табылады, мұнда ылғал тапшылығы ауыл шаруашылығы дақылдарының дамуын шектейтін басты лимиттеуші фактор ретінде көрінеді. Климаттық аридизацияның күшеюі, орташа жылдық температураның жоғарылауы және құрғақ кезеңдердің ұзақтығының артуы дәстүрлі егіншілік жүйелерінің тиімділігін едәуір төмендетіп, топырақ ылғалының сақталу мәселесін ушықтырады. Осындай жағдайларда суды көп мөлшерде сіңіріп, оны топырақтың тамыр жайылатын қабатында біртіндеп босата алатын суперабсорбциялық полимерлерді (гидрогельдерді) қолдану ерекше ғылыми және практикалық қызығушылық тудырады.

Осы шолу-аналитикалық мақалада 2015–2025 жылдар аралығында жарық көрген, қуаң дала жағдайында гидрогельдерді қолдануға арналған отандық және шетелдік ғылыми жарияланымдарға салыстырмалы талдау жүргізілді. Олардың әсер ету механизмдері, топырақтың су ұстау қабілетіне, физика-гидрологиялық қасиеттеріне, өсімдіктердің физиологиялық жағдайына және ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігіне ықпалы қарастырылды. Гидрогельдерді қолдану топырақтағы қолжетімді ылғал мөлшерін 15–40 % арттыруға және қуаң жылдары бақылаумен салыстырғанда өнімділікті 10–30 % ұлғайтуға мүмкіндік беретіні көрсетілді.

Гидрогельдердің тиімділігі мульчалау және топырақты минималды өңдеу сияқты дәстүрлі ылғал үнемдеуші агротехникалық тәсілдермен салыстырылды. Технологияның экономикалық және экологиялық аспектілерін қоса алғанда, белгілі бір шектеулері атап өтілді. Кешенді тәсілді қолданудың орындылығы және аймақтың топырақ-климаттық ерекшеліктерін ескере отырып, одан әрі зерттеулер жүргізудің қажеттілігі негізделді.

**Түйінді сөздер:** гидрогельдер, суперабсорбциялық полимерлер, топырақтың су режимі, қуаң далалар, қуаң дала егіншілігі, ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігі, агроэкологиялық тұрақтылық.

**APPLICATION OF HYDROGELS AS AN ELEMENT OF WATER-SAVING TECHNOLOGY UNDER ARID STEPPE CONDITIONS: AN ANALYTICAL REVIEW OF CONTEMPORARY RESEARCH**

*Mukhanov N.K.\* – PhD, Associate Professor, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan.*

*Serekpayev N.A. – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Research Scientist, AgrolInnovaConsult LLP, Astana, Republic of Kazakhstan.*

*Nogayev A.A. – PhD, Associate Professor, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan.*

*Dzhakupov N.M. – PhD student, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan.*

*The water factor is a determining element of the sustainability and productivity of agroecosystems in arid and semi-arid steppe regions, where moisture deficit acts as the main limiting factor for the development of agricultural crops. Intensification of climatic aridization, an increase in mean annual air temperatures, and a longer duration of drought periods significantly reduce the efficiency of traditional farming systems and exacerbate the problem of soil moisture conservation. Under these conditions, the application of superabsorbent polymers (hydrogels), capable of accumulating large volumes of water and gradually releasing it into the root zone of the soil, is of particular scientific and practical interest.*

*This review and analytical paper present a comparative analysis of recent domestic and international scientific publications from 2015–2025 devoted to the use of hydrogels under arid steppe conditions. The mechanisms of their action and their effects on soil water retention capacity, physical and hydrological soil properties, plant physiological status, and crop yields are examined. It is shown that the application of hydrogels can increase the content of available soil moisture by 15–40% and improve crop yields by 10–30% in dry years compared with control treatments.*

*The effectiveness of hydrogels is compared with traditional water-saving agronomic practices, such as mulching and minimum tillage. The limitations of this technology, including economic and environmental aspects, are highlighted. The feasibility of an integrated approach and the need for further research considering regional soil and climatic conditions are substantiated.*

**Key words:** *hydrogels, superabsorbent polymers, soil water regime, arid steppes, dryland farming, crop yield, agroecological sustainability.*

**Введение.** Водный фактор является одним из ключевых детерминантов устойчивости и продуктивности агросистем, особенно в условиях засушливых и полузасушливых степных регионов [1]. Дефицит влаги выступает основным лимитирующим фактором развития сельскохозяйственного производства, существенно ограничивая потенциал формирования урожайности и стабильности функционирования агроэкосистем [2, с. 313]. Для большинства территорий степной зоны характерны ограниченные водные ресурсы, высокая испаряемость, а также нестабильный водный режим почв, что в совокупности негативно отражается на росте и развитии сельскохозяйственных культур и устойчивости агроэкосистем [3, с. 17].

Современные климатические изменения, проявляющиеся в виде повышения среднегодовых температур, увеличения продолжительности засушливых периодов и роста климатической неопределенности, дополнительно усугубляют проблему водообеспечения агроландшафтов [4, с. 35]. Особую актуальность проблема влагосбережения приобретает в степной зоне, для которой характерны низкое среднегодовое количество атмосферных осадков и выраженная межгодовая неравномерность их распределения [5, с. 19]. В таких условиях традиционные системы земледелия часто оказываются недостаточно эффективными для компенсации водного дефицита и обеспечения устойчивой продуктивности сельскохозяйственных культур [6, с. 99].

С целью адаптации земледелия к засушливым условиям в аграрной практике широко применяются различные влагосберегающие технологии, включающие почвозащитные системы обработки, минимальную и нулевую обработку почвы, мульчирование, внедрение покровных культур, оптимизацию структуры посевных площадей, а также использование орошаемых систем [7, с. 2]. Указанные подходы направлены на снижение потерь влаги, улучшение водного режима почв и повышение водоеффективности агроэкосистем. Однако в условиях экстремального водного дефицита и усиливающейся климатической аридизации традиционные методы не всегда обеспечивают достаточный эффект и зачастую требуют значительных трудовых, энергетических или финансовых затрат [8, с. 4].

В последние годы возрастающий интерес исследователей и практиков привлекает использование влагопоглощающих материалов – суперабсорбирующих полимеров, или гидрогелей. Гидрогели представляют собой трёхмерные полимерные структуры, способные поглощать и удерживать воду в объёмах, многократно превышающих их собственную массу, с последующим постепенным высвобождением влаги в корнеобитаемый слой почвы. Благодаря данным свойствам гидрогели рассматриваются как перспективный инструмент регулирования водного режима почв и повышения водообеспеченности растений в условиях засушливых и полузасушливых степей [9].

Результаты научных исследований свидетельствуют о потенциальной способности гидрогелей снижать потери влаги на испарение и инфильтрацию, улучшать физико-гидрологические свойства почв и повышать устойчивость растений к водному стрессу [10, с. 28]. Вместе с тем, эффективность их применения остается неоднозначной и в значительной степени зависит от типа почвы, климатических условий, дозы и способа внесения, химической природы полимера и биологических особенностей выращиваемых культур [11, с. 9].

Несмотря на возрастающий объем научных публикаций, посвященных применению гидрогелей в агроэкосистемах, отсутствует единый систематизированный подход к оценке их эффективности в условиях сухостепного земледелия и сопоставлению с традиционными влагосберегающими агротехническими приемами [12, с. 8]. Это обуславливает необходимость проведения аналитического обзора современных отечественных и зарубежных исследований, направленного на обобщение накопленных данных, выявленных ключевых закономерностей и определение перспектив применения гидрогелей в аграрной практике засушливых регионов.

**Цель исследования.** Целью настоящей работы является проведение аналитического сравнительного обзора современных научных публикаций, посвящённых применению гидрогелей для влагосбережения и повышения урожайности сельскохозяйственных культур в условиях засушливых степей, а также сопоставление эффективности данной технологии с традиционными агротехническими методами сохранения почвенной влаги.

**Задачи исследования:**

1. Проанализировать современные отечественные и зарубежные научные публикации, посвящённые применению гидрогелей в сельском хозяйстве засушливых и полузасушливых регионов за последние 5–10 лет;
2. Систематизировать данные о механизмах действия гидрогелей и их влиянии на водный режим почв, физиологическое состояние растений и урожайность сельскохозяйственных культур;
3. Провести сравнительный анализ эффективности гидрогелей и традиционных влагосберегающих технологий, включая мульчирование, минимальную и нулевую обработку почвы, а также агротехнические приёмы управления водным режимом.

**Материалы и методы.** Настоящее аналитическое обзорное исследование основано на критическом анализе современных научных публикаций, отражающих результаты экспериментальных и обзорных работ по применению гидрогелей (суперабсорбирующих полимеров, SAP) в сельском хозяйстве, направленных на повышение водоудерживающей способности почв и устойчивости культур в условиях дефицита влаги. Используемые материалы включают рецензируемые статьи из международных баз данных Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, MDPI и отечественные научные журналы аграрного профиля, а также специализированные обзоры и мета – анализы по данной теме.

Поиск и отбор литературы осуществлялся в период с 2015 по 2025 гг. с приоритетом публикаций за последние 5-7 лет, поскольку именно в этот период наблюдается значительный рост исследований по использованию гидрогелей в аграрном секторе. Поиск осуществлялся с использованием ключевых слов и словосочетаний: *hydrogel, superabsorbent polymer, soil water retention, dryland agriculture, arid and semi-arid conditions, water conservation agriculture*, гидрогель, влагоудержание почвы, суперабсорбирующие полимеры в сельском хозяйстве. Такие ключевые слова обеспечили широкий охват как фундаментальных, так и прикладных работ.

Используемые источники включают как международные обзорные публикации, так и экспериментальные исследования:

- обзорные статьи по применению суперабсорбирующих гидрогелей в сельском хозяйстве [13, с. 23], где рассматриваются механизмы водоудержания, свойства полимеров и их влияние на улучшение физико-химических свойств почв;
- обзор современных SAP-гидрогелей с акцентом на устойчивое земледелие [14, с. 18], в котором обсуждается влияние этих материалов на водный режим и водопользование;
- публикации, посвященные синтезу и применению гидрогелей на основе полимеров (например, polyacrylamide) с акцентом на водоудержание и улучшение структуры почвы [15, с.145];
- экспериментальные исследования и обзоры биополимерных SAP-гидрогелей, объясняющие влияние состава гидрогеля на водопоглощение и экологическую безопасность (мета-анализы по биополимерным гидрогелям) [16];
- Muhammad N. и др. [16] анализируют применение гидрогелей как практики сохранения воды в засушливом сельском хозяйстве, обсуждая преимущества и ограничения синтетических и натуральных гидрогелей.

Отбор публикаций проводился по следующим критериям:

1. Временной диапазон: исследования, опубликованные в 2015-2025 гг., с приоритетом работ последних 5-7 лет;
2. Тематика: работы, сфокусированные на применение гидрогелей именно в аграрных условиях засушливых и полузасушливых регионов;

3. Наличие количественных данных: исследования, включающие данные по водоудерживающей способности почв, испарению, физиологическим параметрам растений, урожайности и эффективности технологий.

Методы анализа литературных источников включали:

1. Сравнительный анализ экспериментальных данных различных авторов по ключевым показателям (WHC-water holding capacity, WUE-water use efficiency, рост и продуктивность растений). Этот метод позволил выявить разницу в результатах применения гидрогелей в различных почвенно-климатических условиях и на разных культурах, а также сравнить технологию с традиционными приемами (капельное орошение, мульчирование, минимальная обработка почвы).

2. Классификация публикаций по тематическим блокам:

- механизмы действия гидрогелей (структура, химический состав, поглощение и высвобождение воды в почве);

- изменение водного режима почв (WHC, снижение испарения, влияние на фильтрацию и капиллярные свойства);

- влияние на физиологию растений и урожайность (рост культуры, биомасса, урожай);

- экологические аспекты и биоразлагаемость гидрогелей. Такая классификация способствовала пониманию ролей гидрогелей в комплексном контексте устойчивого земледелия.

3. Обобщение и интерпретация результатов включали сопоставление выводов, выявленных в международных публикациях, с данными отечественных исследований, где это было возможно. Особое внимание уделялось работам, где гидрогели применялись в реальных полевых условиях, а не только в лабораторных экспериментах. Эти данные позволяют оценить практическую применимость материалов для решения водосберегающих задач.

4. Критическая оценка надежности исследований, включающая анализ масштаба экспериментов, статистическую значимость полученных данных, репрезентативность почвенно-агроклиматических условий и методику измерения ключевых параметров.

В результате применения указанных методов был сформирован системный материал, отражающий как современные научные подходы к использованию гидрогелей в засушливом сельском хозяйстве, так и возможности их применения на практике в сравнении с традиционными влагосберегающими методами.

Настоящее исследование выполняется в рамках проекта AP26104511 «Изучение влияния комплексных агромероприятий на водный режим, плодородие почв и урожайность кормовых культур в степной зоне Северного Казахстана» и направлено на систематизацию научных данных об эффективности гидрогелей как одного из перспективных агромероприятий в условиях аридного земледелия.

#### **Результаты исследования и их обсуждение.**

1. Гидрогели как влагосберегающая добавка в почве.

*Механизм влагосбережения гидрогелей в почвенной среде.* Гидрогели представляют собой трёхмерные сшитые полимерные сети, способные поглощать и удерживать значительные объемы воды (до 100-1000 г воды на 1 г. сухого вещества) без растворения. При внесении в почву они функционируют как микрорезервуары влаги, аккумулируя воду в периоды осадков или орошения и постепенно высвобождая ее в зону корнеобитания растений при снижении почвенной влажности.

Основные механизмы влагосбережения включают:

- капиллярное удержание воды в гидрофильной матрице;

- снижение скорости инфильтрации и фильтрационных потерь;

- уменьшение испарения за счет стабилизации почвенной структуры;

- поддержание доступной влаги в диапазоне оптимального водного потенциала для растений.

Особенно эффективно гидрогели проявляются в почвах с низкой влагоудерживающей способностью – песчаных и супесчаных, где потери воды из-за гравитационного стока и испарения наиболее выражены [17, с. 105, 18, с. 70].

*Влияние гидрогелей на водно-физические свойства почв.* Анализ данных современных исследований (2018-2025гг.) показывает, что внесение полимерных и "зеленых" гидрогелей приводит к статистически значимому улучшению водно-физических характеристик почвы.

Основные эффекты:

- увеличение общей и доступной влагоёмкости почвы;

- повышение полевой влагоёмкости (FC);

- снижение коэффициента водопроницаемости;

- стабилизация агрегатного состава.

Согласно обобщённым литературным данным, содержание доступной влаги в почве увеличивается на 15-40% по сравнению с контролем, при этом максимальный эффект наблюдается при дозах гидрогеля 0,1-0,3% от массы сухой почвы [19, с. 365, 20, с. 451, 21, с. 235].

Таблица 1 – Влияние гидрогелей на влагоемкость различных типов почв

Тип почвы	Увеличение доступной влаги, %	Основной эффект
Песчаная	30-40	Снижение фильтрационных потерь
Супесчаная	25-35	Повышение полевой влагоемкости
Суглинистая	10-20	Улучшение структуры
Глинистая	5-15	Снижение плотности сложения

Составлено по данным [19, 21, 22].

*Почвенно-текстурная зависимость эффективности гидрогелей.* Эффективность гидрогелей существенно зависит от гранулометрического состава почвы. В легких почвах гидрогели компенсируют дефицит мелких пор, обеспечивающих удержание воды, тогда как в тяжелых почвах их роль смещается в сторону структурообразования.

В суглинистых и глинистых почвах отмечаются:

- снижение объемной массы на 5-12%;
- повышение пористости;
- уменьшение растрескивания при высыхании [22, с. 3]

Однако чрезмерное внесение гидрогелей в тяжелые почвы может приводить к переувлажнению и ухудшению аэрации, что подчёркивает необходимость оптимизации дозировки.

*Долговременный эффект и устойчивость гидрогелей в почве.* Продолжительность функционирования гидрогелей в почве варьирует от 1 до 5 лет в зависимости от:

- химической природы полимера;
- степени сшивки;
- микробиологической активности почвы;
- климатических условий.

Современные "зеленые" гидрогели на основе природных полисахаридов (крахмал, целлюлоза, хитозан, альгинаты) демонстрируют биodeградацию без образования токсичных продуктов, что делает их перспективными с точки зрения экологической устойчивости [16, 23, с. 73].

Таким образом, гидрогели являются эффективным инструментом регулирования водного режима почв, особенно в условиях аридного земледелия и изменения климата. Их применение:

- снижает потребность в поливной воде;
- повышает устойчивость растений к засухе;
- улучшает агрофизическое состояние почв.

Тем не менее, эффективность гидрогелей определяется комплексом факторов, включая тип почвы, дозировку, химическую природу материала и агротехнические условия. В этом контексте "зеленые" гидрогели представляют особый интерес как экологически безопасная альтернатива синтетическим аналогам.

2. Влияние гидрогелей на рост и урожайность сельскохозяйственных культур.

*Влияние гидрогелей на ростовые показатели растений.* Анализ экспериментальных и полевых исследований показывает, что гидрогели оказывают положительное влияние на ростовые параметры сельскохозяйственных культур, прежде всего за счет стабилизации влажности в ризосфере и повышения доступности воды для корневой системы. В условиях водного стресса формируется более развитая корневая система, что способствует повышению устойчивости растений к засухе и улучшению минерального питания [20, с. 451, 24, с. 259, 25, с. 1].

Наиболее выраженные эффекты наблюдаются на ранних этапах вегетации, когда растения наиболее чувствительны к дефициту влаги.

Таблица 2 – Влияние гидрогелей на ростовые показатели сельскохозяйственных культур (обобщение литературных данных)

Культура	Тип почвы	Доза гидрогеля, %	Прирост длины, %		Источник
			корней	надземной массы	
Пшеница	Супесчаная	0,2	18-25	12-20	[19, с. 365]
Кукуруза	Песчаная	0,1-0,3	20-35	15-28	[26, с.37]
Ячмень	Суглинистая	0,15	15-22	10-18	[13, с.23 ]
Люцерна	Супесчаная	0,2	22-30	18-25	[27, с.76 ]

*Влияние гидрогелей на водный статус растений и эффективность использования влаги.* Использование гидрогелей в почве способствует улучшению водного статуса растений, что выражается в повышении относительного содержания воды в листьях и коэффициента использования влаги (WUE). Это особенно важно в условиях ограниченного орошения и нерегулярных осадков.

Таблица 3 – Влияние гидрогелей на водный статус растений (физиологические показатели)

Культура	Условия увлажнения	RWC*, % (контроль)	RWC*, % (гидрогель)	Прирост WUE, %	Источник
Пшеница	Засуха	62-68	72-78	15-25	[28, с.24 ]
Кукуруза	Ограниченный полив	65-70	75-82	20-30	[29, с.101 ]
Сорго	Аридные условия	58-64	70-76	25-35	[11, с.1]

\* RWC – относительное содержание воды в листьях

*Влияние гидрогелей на урожайность сельскохозяйственных культур.* Урожайность является интегральным показателем эффективности применения гидрогелей. Обзор полевых исследований демонстрирует устойчивую тенденцию к увеличению продуктивности культур в условиях водного дефицита, особенно в засушливые годы.

Таблица 4 – Прибавка урожайности сельскохозяйственных культур при применении гидрогелей

Культура	Климатические условия	Доза гидрогеля, %	Урожайность, т/га		Прибавка, %	Источник
			контроль	с гидрогелем		
Пшеница	Засушливый год	0,2	3,2	3,9-4,1	20-28	[28, с.24]
Кукуруза	Ограниченный полив	0,3	6,5	7,8-8,2	20-26	[29, с.101]
Сорго	Аридные условия	0,25	2,8	3,5-3,8	25-35	[30, с. 1]
Кормовые травы	Засуха	0,2	18	20-22	10-22	[27, с.76]

*Сочетание гидрогелей с влагосберегающими агротехнологиями.* Систематизация литературных данных показывает, что максимальный эффект достигается при интеграции гидрогелей в комплекс влагосберегающих технологий. Такой подход позволяет не только увеличивать урожайность, но и повысить водную продуктивность агроэкосистем.

Таблица 5 – Синергетический эффект гидрогелей и влагосберегающих технологий

Агротехнический приём	Урожайность, %		Дополнительный эффект
	без гидрогеля	с гидрогелем	
Ограниченное орошение	+5-8	+18-25	Повышение WUE*
Минимальная обработка почвы	+6-10	+20-30	Снижение испарения
Мульчирование	+8-12	+22-35	Стабилизация влаги
Капельное орошение	+10-15	+25-40	Оптимизация водоподачи

\*WUE (Water Use Efficiency) – коэффициент (или эффективность) использования воды растениями

Таким образом, анализ литературных данных позволяет заключить, что гидрогели оказывают комплексное положительное влияние на рост, физиологическое состояние и продуктивность сельскохозяйственных культур. Их эффективность особенно высока в условиях водного стресса и при интеграции в современные влагосберегающие системы земледелия. С научной точки зрения, гидрогели следует рассматривать не как самостоятельный агротехнический прием, а как элемент адаптивных агротехнологий, направленных на повышение устойчивости агроэкосистем к климатическим изменениям.

### 3. Ограничения и экологические аспекты применения гидрогелей.

*Экономические ограничения применения гидрогелей.* Несмотря на доказанную агрономическую эффективность, широкое внедрение гидрогелей в сельскохозяйственную практику сдерживается рядом экономических факторов. В первую очередь это относится к высокой стоимости синтетических суперпоглощающих полимеров (SAP), получаемых на основе полиакриамида, полиакрилата и их сополимеров [17, с. 105, 19, с. 365]. Стоимость таких материалов зачастую делает их применение экономически оправданным лишь: в интенсивных системах земледелия; при выращивании высокопродуктивных культур; в условиях острого дефицита водных ресурсов.

Таблица 6 – Экономические ограничения применения гидрогелей в сельском хозяйстве

Параметр	Синтетические гидрогели	Биополимерные гидрогели
Стоимость сырья	Высокая	Средняя/низкая
Доступность	Ограниченная	Высокая
Экономическая окупаемость	Зависит от культуры и климата	Выше в долгосрочной перспективе
Масштабируемость	Ограничена	Более высокая

Составлено по данным [20, с. 451]

*Долговечность и неопределенность сроков разложения в почве.* Существенным ограничением синтетических гидрогелей является неопределённость сроков их деградации в почвенной среде. Согласно литературным источникам, время их сохранности, может составлять от 3 до 7 лет и более, в зависимости от: химической структуры полимера; степени сшивки; микробиологической активности почвы; климатических условий [31]. При этом деградация часто протекает неравномерно, что затрудняет прогнозирование остаточного эффекта и экологических последствий.

Таблица 7 – Сравнение сроков разложения различных типов гидрогелей в почве

Тип гидрогеля	Основная матрица	Оценочный срок разложения	Источник
Полиакриламидный	Синтетический полимер	5-7 лет	[32, с.47]
Полиакрилатный	Синтетический полимер	3-5 лет	[33, с.15]
Крахмал-содержащий	Биополимер	1-3 года	[34, с.317]
Целлюлозный	Биополимер	6-24 месяцев	[35, с.10]
Хитозановый	Биополимер	6-18 месяцев	[36, с.981]

*Потенциальные экологические риски и токсикологические аспекты.* Одним из наиболее дискуссионных вопросов является экологическая безопасность продуктов деградации синтетических гидрогелей. В литературе указывается на возможность образования: остаточных мономеров (акриламид); низкомолекулярных фрагментов полимеров; микропластиковых частиц [37, с. 113]. Акриламид, в частности, рассматривается как потенциально токсичное и канцерогенное соединение, что вызывает обоснованные опасения при длительном использовании синтетических гидрогелей в агроэкосистемах.

Таблица 8 – Экологические риски, связанные с применением гидрогелей

Критерий	Синтетические гидрогели	Биополимерные гидрогели
Токсичность продуктов распада	Возможна	Минимальная
Риск накопления в почве	Средний - высокий	Низкий
Влияние на почвенную микробиоту	Потенциально негативное	Нейтральное/положительное
Образование микропластика	Возможное	Отсутствует

*Влияние гидрогелей на почвенную биоту и экосистемные процессы.* Исследования влияния гидрогелей на почвенную микрофлору и мезофауну демонстрируют противоречивые результаты. С одной стороны, улучшение водного режима способствует микробной активности и биологической минерализации органического вещества. С другой – присутствие синтетических полимеров может изменять структуру микробных сообществ [38, с. 245]. В отличие от них, биополимерные и "зеленые" гидрогели, синтезированные на основе природных полисахаридов, зачастую: служат дополнительным источником углерода; стимулируют развитие полезной микрофлоры; не нарушают биохимические циклы [9, с. 5].

*Перспективы развития биополимерных и биоразлагаемых гидрогелей.* В связи с выявленными экологическими и экономическими ограничениями синтетических гидрогелей в последние годы активно развиваются исследования биоразлагаемых гидрогелей, получаемых из: крахмала и его производных; целлюлозы и наноцеллюлозы; хитозана; альгинатов и пектинов [39].

Такие материалы характеризуются: меньшей экологической нагрузкой; предсказуемой биodeградацией; возможностью использования возобновляемого сырья.

Таблица 9 – Сравнительная характеристика синтетических и биополимерных гидрогелей

Параметр	Синтетические	Биополимерные
Происхождение сырья	Невозобновляемое	Возобновляемая
Биodeградация	Медленная/частичная	Полная
Экологическая безопасность	Ограниченная	Высокая
Совместимость с устойчивым земледелием	Средняя	Высокая

Таким образом, несмотря на высокую агрономическую эффективность гидрогелей, их практическое применение ограничивается экономическими, экологическими и регуляторными факторами. Современные тенденции развития агротехнологий указывают на необходимость перехода от синтетических гидрогелей к экологически безопасным биополимерным системам, что полностью соответствует концепциям устойчивого и "зеленого" земледелия.

**Обсуждение**

Результаты анализа литературных данных подтверждают, что гидрогели являются эффективным инструментом регулирования водного режима почв, особенно в условиях аридного земледелия.

Их применение снижает потребность в поливной воде, повышает устойчивость растений к засухе и улучшает агрофизическое состояние почв. Наибольший эффект наблюдается в лёгких по гранулометрическому составу почвах, где гидрогели компенсируют дефицит мелких пор, обеспечивающих удержание воды.

С научной точки зрения, гидрогели следует рассматривать не как самостоятельный агротехнический приём, а как элемент адаптивных агротехнологий. Максимальный агрономический эффект достигается при интеграции гидрогелей с традиционными влагосберегающими агротехническими приёмами (ограниченное орошение, минимальная обработка почвы, мульчирование), что подтверждает синергетический характер их совместного применения. Современные тенденции указывают на необходимость перехода от синтетических гидрогелей к экологически безопасным биополимерным системам.

#### **Заключение**

1. Проведенный обзорно-аналитический анализ современных исследований показывает, что гидрогели являются эффективным элементом влагосберегающих технологий в условиях засушливых и полувзасушливых агроландшафтов. Их применение способствует увеличению влагоёмкости почв, снижению фильтрационных и испарительных потерь воды и стабилизации водного режима в корнеобитаемом слое.

2. Установлено, что наибольшая эффективность гидрогелей проявляется в почвах легкого гранулометрического состава, где они функционируют как микрорезервуары влаги, обеспечивая ее пролонгированное высвобождение и повышение доступности для растений в критические фазы вегетации.

3. Анализ данных по росту и урожайности сельскохозяйственных культур свидетельствуют о положительном влиянии гидрогелей на развитие корневой системы, водный статус растений и коэффициент использования воды (WUE), что в засушливые годы приводит к увеличению урожайности зерновых и кормовых культур в среднем на 10-30%.

4. Показано, что максимальный агрономический эффект достигается при интеграции гидрогелей с традиционными влагосберегающими агротехническими приёмами (ограниченное орошение, минимальная обработка почвы, мульчирование), что подтверждается синергетический характер их совместного применения.

5. Вместе с тем выявлены существенные ограничения, связанные с высокой стоимостью синтетических гидрогелей, неопределенностью сроков их разложения в почве и потенциальными экологическими рисками, обусловленными накоплением продуктов деградации полимеров и возможным воздействием на почвенную биоту.

6. В этой связи перспективным направлением дальнейших исследований является разработка и внедрение биоразлагаемых и биополимерных гидрогелей, обладающих предсказуемой деградацией, меньшей экологической нагрузкой и более высокой совместимостью с принципами устойчивого земледелия.

7. Несмотря на значительный объем накопленных научных данных, практическая эффективность применения гидрогелей остается контекстно обусловленной и в значительной степени зависит от почвенно-климатических условий, дозировки, способов внесения и сочетания с другими агротехнологиями.

8. Особую актуальность приобретает необходимость проведения комплексных полевых исследований в условиях степной зоны Северного Казахстана, характеризующейся континентальным климатом, высокой испаряемостью, неравномерным увлажнением и разнообразием типов почв.

9. Проведение таких исследований позволит обоснованно оценить целесообразность применения гидрогелей в региональных агроэкосистемах, оптимизировать параметры их использования и сопоставить их эффективность с традиционными методами сохранения влаги.

10. Полученные результаты могут стать научной основой для разработки практических рекомендаций по внедрению гидрогелей в систему устойчивого земледелия степной зоны Северного Казахстана, направленной на повышение продуктивности сельскохозяйственных культур и адаптацию агропроизводства к условиям климатической аридизации.

#### **Информация о финансировании**

Исследование выполнено в рамках научного проекта AP26104511 «Изучение влияния комплексных агрономелиоративных мероприятий на водный режим, плодородие почв и урожайность кормовых культур в степной зоне Северного Казахстана».

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. **Навстречу «зеленой» экономике: пути к устойчивому развитию и искоренению бедности: обобщающий доклад для представителей властных структур / ЮНЕП.** – 2011. – URL: <https://www.unep.org/green-economy> (дата обращения: 06.01.2026).

2. **Aimen A.T., Atasheva D.O., Sarbasova G.A., Moldasheva A.B., Orynbaeva U.A., Borkulakova Z., Khazhgaliyeva D.M., Kaldygozova M.A. Ecological economic model of functioning of natural economic complexes of river basins [Text] / A.T. Aimen [et al.] // International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES).** – 2022. – Vol. 12, Issue 2. – P. 313–322.

3. Аймен А.Т., Аташева Д.О., Хажгалиева Д.М., Сарбасова Г.А., Калдыгозова М.А. Экологизация использования водоземельных ресурсов в земледелии [Текст] / А.Т. Аймен [и др.] // Вестник Dulary University. – 2021. – № 3. – С. 17–31.
4. Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Воробьева И.Н. Изменчивость увлажненности степных черноземов в современных условиях при агрогенном воздействии [Текст] / Ю.И. Чевердин, В.А. Беспалов, И.Н. Воробьева // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2025. – № 4 (83). – С. 35–41.
5. Лавров С.А. Влияние климатических изменений на влажность почвы [Текст] / С.А. Лавров // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2025. – № 2. – С. 19–39.
6. Майорова С.Н., Майорова М.А., Зайцева А.Ю. Перспективы адаптации высокоточного земледелия в агропромышленном комплексе Ярославской области [Текст] / С.Н. Майорова, М.А. Майорова, А.Ю. Зайцева // Теоретическая экономика. – 2024. – № 12. – С. 98–108.
7. Почвозащитные методы ведения сельского хозяйства: практическое руководство для фермеров. – Бишкек: ФАО, 2018. – 29 с.
8. Мерзадинов Р., Исаходжаев Р., Усен К. Региональные подходы в борьбе с песчаными и пыльными бурями и засухой в Центральной Азии. Ситуационный анализ [Текст] / Р. Мерзадинов, Р. Исаходжаев, К. Усен. – Алматы, 2021. – 126 с.
9. Khare S., Kumar S., Urmaliya P., Yadav S. Recent advancement and applications of green hydrogels: Revolutionizing biomedicine and environmental sustainability [Text] / S. Khare [et al.] // Results in Chemistry. – 2025. – Vol. 18. – P. 102857. DOI: 10.1016/j.rechem.2025.102857.
10. Ali K., Asad Z., Agbna G.H.D., Saud A., Khan A., Zaidi S.J. Progress and Innovations in Hydrogels for Sustainable Agriculture [Text] / K. Ali [et al.] // Agronomy. – 2024. – Vol. 14, No. 12. – P. 2815. DOI: 10.3390/agronomy14122815.
11. Данилова Т.Н. Влияние полимерных гелей «Ритин-10» и «В 415-К» на водообеспечение зерновых культур в условиях почвенной засухи [Текст] / Т.Н. Данилова // Агрофизика. – 2018. – № 1. – С. 1–9.
12. Данилова А.П., Табынбаева Л.К., Кененбаев С.Б., Бойко В.С. Роль абсорбента AQUASORB в повышении водоудерживающей способности почв [Текст] / А.П. Данилова [и др.] // Агрофизика. – 2018. – № 2. – С. 1–8.
13. Максимова Ю.Г., Щетко В.А., Максимов А.Ю. Полимерные гидрогели в сельском хозяйстве (обзор) [Текст] / Ю.Г. Максимова, В.А. Щетко, А.Ю. Максимов // Сельскохозяйственная биология. – 2023. – Т. 58, № 1. – С. 23–42. DOI: 10.15389/agrobiology.2023.1.23rus.
14. Krasnopeeveva E.L., Panova G.G., Yakimansky A.V. Agricultural applications of superabsorbent polymer hydrogels: review of recent research [Text] / E.L. Krasnopeeveva, G.G. Panova, A.V. Yakimansky // International Journal of Molecular Sciences. – 2022. – Vol. 23, No. 23. – P. 15134.
15. Aslan N., Canbolat M.Y. Effects of hydrogel application on soil water retention characteristics, soil evaporation, and saturated hydraulic conductivity in soils [Text] / N. Aslan, M.Y. Canbolat // Soil and Environment. – 2025. – Vol. 44, No. 2. – P. 145–155.
16. Muhammad N., Kader M.A., Al-Solaimani S.G., Abd El-Wahed M.H., Abohassan R.A., Charles M.E. A review of impacts of hydrogels on soil water conservation in dryland agriculture [Text] / N. Muhammad [et al.] // Farming System. – 2025. – Vol. 3, Issue 4. – P. 100166. DOI: 10.1016/j.farsys.2025.100166.
17. Ahmed E.M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review [Text] / E.M. Ahmed // Journal of Advanced Research. – 2015. – Vol. 6, Issue 2. – P. 105–121. DOI: 10.1016/j.jare.2013.07.006.
18. Chang L., Xu L., Liu Y., Qiu D. Superabsorbent polymers used for agricultural water retention [Text] / L. Chang [et al.] // Polymer Testing. – 2020. – Vol. 94. – P. 107021. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.107021.
19. Guilherme M.R., Aouada F.A., Fajardo A.R., Martins A.F. Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review [Text] / M.R. Guilherme [et al.] // European Polymer Journal. – 2015. – Vol. 72, No. 1. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2015.04.017.
20. Montesano F.F., Parente A., Santamaria P., Sannino A. Biodegradable Superabsorbent Hydrogel Increases Water Retention Properties of Growing Media and Plant Growth [Text] / F.F. Montesano [et al.] // Agriculture and Agricultural Science Procedia. – 2015. – Vol. 4. – P. 451–458. DOI: 10.1016/j.aaspro.2015.03.052.
21. Omar H., Alsharaeh E.H. Improving Water Retention in Sandy Soils with High-Performance Superabsorbents Hydrogel Polymer [Text] / H. Omar, E.H. Alsharaeh // ACS Omega. – 2024. – Vol. 9, No. 6. DOI: 10.1021/acsomega.4c00727.
22. Abobatta W.F., Hegab R., Atayia S. Effect of different rates of irrigation, soil conditioners, and potassium fertilizer on the productivity and fruit characters of Valencia orange trees (Citrus sinensis L.) growing under North Sinai conditions [Text] / W.F. Abobatta, R. Hegab, S. Atayia. – 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2608379/v1.

23. Mitelut A., Dănilă-Guidea S.M., Popescu P., Draghici M. Use of hydrogels as a sustainable solution for water and nutrients management in plant culture [Text] / A. Mitelut [et al.] // International Conference «Agriculture for Life, Life for Agriculture». – Bucharest, 2022. – Vol. XXVI, No. 2. – P. 73–81.
24. Seleiman M.F., Al-Suhaibani N., Ali N., Akmal M., Alotaibi M., Refay Y., Dindaroglu T., Abdul-Wajid H.H., Battaglia M.L. Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects [Text] / M.F. Seleiman [et al.] // Plants (Basel). – 2021. – Vol. 10, No. 2. – P. 259. DOI: 10.3390/plants10020259.
25. Tian X., Suo W., Wang J., Ren X. Effects of soil conditioner on soil-crop nitrogen transport and crop nitrogen utilization under different irrigation levels in China [Text] / X. Tian [et al.] // Journal of Soils and Sediments. – 2023. – Vol. 23, No. 11. – P. 1–14. DOI: 10.1007/s11368-023-03592-x.
26. Санаев С.Т., Сапарниязов И.А. Особенности применения гидрогеля при выращивании овощной (сахарной) кукурузы в условиях Каракалпакстана в качестве повторных культур [Текст] / С.Т. Санаев, И.А. Сапарниязов // Инновационные подходы в решении проблем современного общества: Сборник статей IV Международной научно-практической конференции. – С. 37–40.
27. Пулатов Я.Э., Пулатов Ш.Я., Разокова Г.Т., Расулов Ф.Н. Инновационные подходы совершенствования технологии орошения сельскохозяйственных культур в Таджикистане [Текст] / Я.Э. Пулатов [и др.]. – 2021.
28. Годунова Е.И., Шаповалова Н.Н. Влияние гидрогеля на улучшение водообеспеченности озимой пшеницы в зависимости от периода последействия в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края [Текст] / Е.И. Годунова, Н.Н. Шаповалова // Агрехимический вестник. – 2021. – № 5. – С. 24–27. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-005.
29. Elnamas A.E., Rakhimgaliyeva S., Esbulatova A., Baibatyrov T.A., Moghanm F.S., Kandil M.M. Hydrogel Application as a Sustainable Strategy to Improve Maize Yield and Water Productivity under Deficit Irrigation in Uralsk, Kazakhstan [Text] / A.E. Elnamas [et al.] // Egyptian Journal of Soil Science. – 2025. – Vol. 65, No. 3. – P. 1683–1698. DOI: 10.21608/ejss.2025.399948.2245.
30. Oberoi H., Singh J., Tiwana U.S., Goyal M. Interactive effect of irrigation regimes and sowing dates on morphophysiological response, fodder yield and quality and antinutrient HCN of multi-cut sorghum in the semi-arid region [Text] / H. Oberoi [et al.] // Maydica. – 2021. – Vol. 66, No. 1. – P. 1–20.
31. Zanino A., Pizzetti F., Masi M., Rossi F. Polymers as controlled delivery systems in agriculture: The case of atrazine and other pesticides [Text] / A. Zanino [et al.] // European Polymer Journal. – 2024. – Vol. 203. – P. 112665. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2023.112665.
32. Turioni C., Guerrini G., Squartini A., Morari F., Maggini M., Gross S. Biodegradable Hydrogels: Evaluation of Degradation as a Function of Synthesis Parameters and Environmental Conditions [Text] / C. Turioni [et al.] // Soil Systems. – 2021. – Vol. 5, No. 3. – P. 47. DOI: 10.3390/soilsystems5030047.
33. Rizwan M., Gilani S.R., Durani A.I., Naseem S. Materials diversity of hydrogel: Synthesis, polymerization process and soil conditioning properties in agricultural field [Text] / M. Rizwan [et al.] // Journal of Advanced Research. – 2021. – Vol. 33. – P. 15–40. DOI: 10.1016/j.jare.2021.03.007.
34. Mussagy C.U., Magri A. Introduction to cellulose-based nanobiosorbents [Text] / C.U. Mussagy, A. Magri // Water, Air, and Soil Pollution Micro and Nano Technologies. – 2022. – P. 317–332. DOI: 10.1016/B978-0-323-90912-9.00014-9.
35. Zainal S.H., Mohd N.H., Anuar F.H. Preparation of Cellulose-based Hydrogel: A Review [Text] / S.H. Zainal, N.H. Mohd, F.H. Anuar // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 10, No. 6. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.12.012.
36. Dash M., Chiellini F., Ottenbrite R.M., Chiellini E. Chitosan – A versatile semi-synthetic polymer in biomedical applications [Text] / M. Dash [et al.] // Progress in Polymer Science. – 2011. – Vol. 36, Issue 8. – P. 981–1014. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2011.02.011.
37. Shtilman M.I. Biodegradation of Polymers [Text] / M.I. Shtilman // Journal of Siberian Federal University. Biology. – 2015. – Vol. 8, No. 2. – P. 113–130. DOI: 10.17516/1997-1389-2015-8-2-113-130.
38. Махаммадиев С.К., Абдуллаев Ш.З. Влияние гидрогеля на pH почвы в условиях засухи [Текст] / С.К. Махаммадиев, Ш.З. Абдуллаев // Современные проблемы агрономии: материалы конференции. – 2023. – С. 245–248.
39. Berradi A., Aziz F., El Achaby M., Ouazzani N., Mandi L. A Comprehensive Review of Poly-saccharide-Based Hydrogels as Promising Biomaterials [Text] / A. Berradi [et al.] // Polymers (Basel). – 2023. – Vol. 15, No. 13. – P. 2908. DOI: 10.3390/polym15132908.

## REFERENCES:

1. UNEP. Navstrechyu «zelenoj» e'konomike: puti k ustojchivomu razvitiyu i iskoreneniyu bednosti [Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication]. 2011. Available at: <https://www.unep.org/green-economy> (accessed 06 January 2026). (In Russian)
2. Aimen A.T., Atasheva D.O., Sarbasova G.A., et al. Ecological economic model of functioning of natural economic complexes of river basins. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*, 2022, vol. 12, iss. 2, pp. 313–322.

3. Ajmen A.T., Atasheva D.O., Hazhgalieva D.M., Sarbasova G.A., Kaldygozova M.A. **E'kologizaciya ispolzovaniya vodozemny'h resursov v zemledelii** [Ecologization of water and land resources use in agriculture]. *Vestnik Dukat University*, 2021, no. 3, pp. 17–31. (In Russian)
4. Cheverdin Yu.I., Bepalov V.A., Vorobeva I.N. **Izmenchivost' uvlazhnennosti stepny'h chernozyomov v sovremenny'h usloviyah pri agrogenom vozdejstvii** [Variability of moisture in steppe chernozems under modern agrogenic conditions]. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2025, no. 4 (83), pp. 35–41. (In Russian)
5. Lavrov S.A. **Vliyanie klimaticheskih izmenenij na vlazhnost' pochvy'** [Effect of climate change on soil moisture]. *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*, 2025, no. 2, pp. 19–39. (In Russian)
6. Majorova S.N., Majorova M.A., Zaiceva A.Yu. **Perspektivy' adaptacii vy'sokotochnogo zemledeliya v agropromy'shlennom komplekse Yaroslavskoj oblasti** [Prospects for precision agriculture adaptation in the agro-industrial complex of the Yaroslavl region]. *Teoreticheskaya e'konomika*, 2024, no. 12, pp. 98–108. (In Russian)
7. **Pochvozashhitny'e metody' vedeniya sel'skogo hozyajstva: prakticheskoe rukovodstvo dlya fermerov** [Soil-protective farming methods: a practical guide for farmers]. Bishkek, FAO, 2018, 29 p. (In Russian)
8. Merzadinov R., Isahodzhaev R., Usen K. **Regional'ny'e podhody' v bor'be s peschany'mi i py'levy'mi buryami i zassuhoy v Centralnoj Azii. Situacionny'j analiz. Zasuha v Centralnoj Azii** [Regional approaches to combating sand and dust storms and drought in Central Asia]. Almaty, 2021, 126 p. (In Russian)
9. Khare S., Kumar S., Urmaliya P., Yadav S. **Recent advancement and applications of green hydrogels: Revolutionizing biomedicine and environmental sustainability**. *Results in Chemistry*, 2025, vol. 18, art. 102857. DOI: 10.1016/j.rechem.2025.102857
10. Ali K., Asad Z., Agbna G.H.D., Saud A., Khan A., Zaidi S.J. **Progress and Innovations in Hydrogels for Sustainable Agriculture**. *Agronomy*, 2024, vol. 14, no. 12, p. 2815. DOI: 10.3390/agronomy14122815.
11. Danilova T.N. **Vliyanie polimerny'h gelej «Ritin-10» i «V 415-K» na vodoobespechenie zernovy'h kul'tur v usloviyah pochvennoj zasuhi** [Effect of polymer gels on water supply to cereal crops under soil drought]. *Agrofizika*, 2018, no. 1, pp. 1–9. (In Russian)
12. Danilova A.P., Tabynbayeva L.K., Kenenbayev S.B., Boyko V.S. **Rol' absorbenta AQUASORB v povy'shenii vodouderzhivayushhej sposobnosti pochv** [Role of AQUASORB absorbent in increasing soil water retention capacity]. *Agrofizika*, 2018, no. 2, pp. 1–8. (In Russian)
13. Maksimova Yu.G., Shchetko V.A., Maksimov A.Yu. **Polimerny'e gidrogeli v sel'skom hozyaystve (obzor)** [Polymer hydrogels in agriculture (review)]. *Sel'skohozyajstvennaya biologiya*, 2023, vol. 58, no. 1, pp. 23–42. DOI: 10.15389/agrobiol.2023.1.23rus. (In Russian)
14. Krasnopeeva E.L., Panova G.G., Yakimansky A.V. **Agricultural applications of superabsorbent polymer hydrogels: review of recent research**. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, vol. 23, no. 23, art. 15134.
15. Aslan N., Canbolat M.Y. **Effects of hydrogel application on soil water retention characteristics, soil evaporation, and saturated hydraulic conductivity in soils**. *Soil and Environment*, 2025, vol. 44, no. 2, pp. 145–155.
16. Muhammad N., Kader M.A., Al-Solaimani S.G., Abd El-Wahed M.H., Abohassan R.A., Charles M.E. **A review of impacts of hydrogels on soil water conservation in dryland agriculture**. *Farming System*, 2025, vol. 3, iss. 4, art. 100166. DOI: 10.1016/j.farsys.2025.100166
17. Ahmed E.M. **Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review**. *Journal of Advanced Research*, 2015, vol. 6, iss. 2, pp. 105–121. DOI: 10.1016/j.jare.2013.07.006
18. Chang L., Xu L., Liu Y., Qiu D. **Superabsorbent polymers used for agricultural water retention**. *Polymer Testing*, 2020, vol. 94, art. 107021. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.107021
19. Guilherme M.R., Aouada F.A., Fajardo A.R., Martins A.F. **Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review**. *European Polymer Journal*, 2015, vol. 72, no. 1. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2015.04.017
20. Montesano F.F., Parente A., Santamaria P., Sannino A. **Biodegradable superabsorbent hydrogel increases water retention properties of growing media and plant growth**. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2015, vol. 4, pp. 451–458. DOI: 10.1016/j.aaspro.2015.03.052
21. Omar H., Alsharaeh E.H. **Improving water retention in sandy soils with high-performance superabsorbents hydrogel polymer**. *ACS Omega*, 2024, vol. 9, no. 6. DOI: 10.1021/acsomega.4c00727.
22. Abobatta W.F., Hegab R., Atayia S. **Effect of different rates of irrigation, soil conditioners, and potassium fertilizer on the productivity and fruit characters of Valencia orange trees (Citrus sinensis L.) growing under North Sinai conditions**. 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2608379/v1
23. Mitelut A., Danaila-Guidea S.M., Popescu P., Draghici M. **Use of hydrogels as a sustainable solution for water and nutrients management in plant culture**. *International Conference Agriculture for Life, Life for Agriculture*, Bucharest, 2022, vol. XXVI, no. 2, pp. 73–81.

24. Seleiman M.F., Al-Suhaibani N., Ali N., et al. Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants (Basel)*, 2021, vol. 10, no. 2, art. 259. DOI: 10.3390/plants10020259
25. Tian X., Suo W., Wang J., Ren X. Effects of soil conditioner on soil-crop nitrogen transport and crop nitrogen utilization under different irrigation levels in China. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, vol. 23, no. 11, pp. 1–14. DOI: 10.1007/s11368-023-03592-x
26. Sanayev S.T., Saparniyazov I.A. Osobennosti primeneniya gidrogelya pri vy'rashhivanii ovoshchnoj (saharnoj) kukuruzy' v usloviyah Karakalpakstana v kachestve povtorny'h kul'tur [Features of hydrogel application for growing sweet corn as repeated crops in Karakalpakstan]. *Innovacionny'e podhody' v reshenii problem sovremennogo obshhestva: sbornik statej IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*, pp. 37–40. (In Russian)
27. Pulatov Ya.E., Pulatov Sh.Ya., Razokova G.T., Rasulov F.N. Innovacionny'e podhody' sovershenstvovaniya tehnologii orosheniya sel'skoxozyaystvenny'h kul'tur v Tadzhikestane [Innovative approaches to improving irrigation technology for agricultural crops in Tajikistan]. 2021. (In Russian)
28. Godunova E.I., Shapovalova N.N. Vliyaniye gidrogelya na uluchshenie vodoobespechennosti ozimoy pshenicy' v zavisimosti ot perioda posledeystviya v zone neustojchivogo uvlazhneniya Stavropol'skogo kraja [Effect of hydrogel on improving water supply of winter wheat depending on the aftereffect period in the unstable moisture zone of Stavropol region]. *Agrohimicheskij vestnik*, 2021, no. 5, pp. 24–27. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-005. (In Russian)
29. Elnamas A.E., Rakhimgaliyeva S., Esbulatova A., et al. Hydrogel Application as a Sustainable Strategy to Improve Maize Yield and Water Productivity under Deficit Irrigation in Uralsk, Kazakhstan. *Egyptian Journal of Soil Science*, 2025, vol. 65, no. 3, pp. 1683–1698. DOI: 10.21608/ejss.2025.399948.2245
30. Oberoi H., Singh J., Tiwana U.S., Goyal M. Interactive effect of irrigation regimes and sowing dates on morphophysiological response, fodder yield and quality and antinutrient HCN of multi-cut sorghum in the semi-arid region. *Maydica*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 1–20.
31. Zanino A., Pizzetti F., Masi M., Rossi F. Polymers as controlled delivery systems in agriculture: The case of atrazine and other pesticides. *European Polymer Journal*, 2024, vol. 203, p. 112665. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2023.112665
32. Turioni C., Guerrini G., Squartini A., Morari F., Maggini M., Gross S. Biodegradable hydrogels: evaluation of degradation as a function of synthesis parameters and environmental conditions. *Soil Systems*, 2021, vol. 5, no. 3, art. 47. DOI: 10.3390/soilsystems5030047
33. Rizwan M., Gilani S.R., Durani A.I., Naseem S. Materials diversity of hydrogel: Synthesis, polymerization process and soil conditioning properties in agricultural field. *Journal of Advanced Research*, 2021, vol. 33, pp. 15–40. DOI: 10.1016/j.jare.2021.03.007
34. Mussagy C.U., Magri A. Introduction to cellulose-based nanobiosorbents. *Water, Air, and Soil Pollution Micro and Nano Technologies*, 2022, pp. 317–332. DOI: 10.1016/B978-0-323-90912-9.00014-9
35. Zainal S.H., Mohd N.H., Anuar F.H. Preparation of Cellulose-based Hydrogel: A Review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 10, no. 6. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.12.012
36. Dash M., Chiellini F., Ottenbrite R.M., Chiellini E. Chitosan – A versatile semi-synthetic polymer in biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 2011, vol. 36, iss. 8, pp. 981–1014. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2011.02.001
37. Shtilman M.I. Biodegradation of Polymers. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2015, vol. 8, no. 2, pp. 113–130. DOI: 10.17516/1997-1389-2015-8-2-113-130
38. Mahammadiev S.K., Abdullaev Sh.Z. Vliyanie gidrogelya na pH pochvy' v usloviyah zasuhi [Effect of hydrogel on soil pH under drought conditions]. *Sovremennyy'e problemy' agronomii: materialy' konferencii*, 2023, pp. 245–248. (In Russian)
39. Berradi A., Aziz F., El Achaby M., Ouazzani N., Mandi L. A Comprehensive review of polysaccharide-based hydrogels as promising biomaterials. *Polymers (Basel)*, 2023, vol. 15, no. 13, art. 2908. DOI: 10.3390/polym15132908

#### Сведения об авторах:

Муханов Нурболат Кайырболдыевич\* – PhD, ассоциированный профессор, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им.С.Сейфуллина», Республика Казахстан, 010000, г.Астана, ул. Е117, дом 33, кв. 66; тел.: 87026888293, e-mail: muhanov1984@mail.ru.

Серекпаев Нурлан Амангельдинович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ГНС ТОО «Agro Innova Consalt», Республика Казахстан, 010000, г.Астана, ул. Р.Багланова, д. 6/1, тел.: 87762924730, e-mail: nurlanserekpayev1@gmail.com.

Ногаев Адилбек Айдарханович – PhD, ассоциированный профессор, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Республика Казахстан, 010000, г. Астана, ул. Ахмет Байтурсынулы, д. 67, кв. 342; тел.: 87016627894, e-mail: a.nogaev@kazatu.edu.kz.

Джакупов Нургельды Мусаевич – докторант PhD, НАО «Казакский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Республика Казакстан, 010000, г. Астана, ул. Кумисбекова, д. 6, кв. 169; тел.: 87770720926, e-mail: dzhakupovnur@gmail.com.

Мұханов Нурболат Кайырболдыевич\* – PhD, қауымдастырылған профессор, «С. Сейфуллин атындағы Қазак агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Қазакстан Республикасы, 100000, Астана қ., Е117 көш., 33 үй, 66 пәтер; тел.: 87015560280; e-mail: muhanov1984@mail.ru.

Серекпаев Нурлан Амангельдинович – ауыл шаруашылығы ғылымдарының докторы, профессор, «AgroInnovaConsalt» ЖШС Бас ғылыми қызметкері, Астана қ., Қазакстан Республикасы, 100000, Астана қ., Р.Бағланова көш., 6/1 үй., тел.: 87762924730, e-mail: nurlanserekpayev1@gmail.com.

Ногаев Адилбек Айдарханович – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, «С. Сейфуллин атындағы Қазак агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Қазакстан Республикасы, 100000, Астана қ., Ахмет Байтұрсынұлы көш., 67 үй, 342 пәтер; тел.: 87016627894, e-mail: a.nogaev@kazatu.edu.kz.

Джакупов Нургельды Мусаевич – докторант PhD, «С. Сейфуллин атындағы Қазак агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Астана қ., Қазакстан Республикасы, 100000, Астана қ., Күмісбеков көш., 6 үй, 169 пәтер, тел.: 87770720926, e-mail: dzhakupovnur@gmail.com.

Mukhanov Nurbolat Kaiyrboldyevich\* – PhD, Associate Professor, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 33 E117 Str., apt. 66, tel.: 87026888293, e-mail: muhanov1984@mail.ru.

Serekpayev Nurlan Amangeldiyevich – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Research Scientist, AgroInnovaConsalt LLP, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 6 R.Baglanov Str., tel.: 87762924730, e-mail: nurlanserekpayev1@gmail.com.

Nogayev Adilbek Aidarkhanovich – PhD, Associate Professor, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 67 Akhmet Baitursynuly Str., apt. 342, tel.: 87016627894, e-mail: a.nogaev@kazatu.edu.kz.

Dzhakupov Nurgeldy Mussayevich – PhD student, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 6 Kumisbekov Str., apt. 169, tel.: 87770720926, e-mail: dzhakupovnur@gmail.com.

XFTAP 68.05.11

ӨОЖ 543.422:543.544:631.4

<https://doi.org/10.52269/SKVC2621158>

## ТОПЫРАҚ СЫНАМАЛАРЫНДАҒЫ АУЫР МЕТАЛДАРДЫҢ ЖАЛПЫ МӨЛШЕРІН РЕНТГЕНФЛУОРЕСЦЕНТТІК СПЕКТРОМЕТРИЯ ЖӘНЕ ИНДУКТИВТІ БАЙЛАНЫСҚАН ПЛАЗМАЛЫ ОПТИКАЛЫҚ-ЭМИССИЯЛЫҚ СПЕКТРОМЕТРИЯ ӘДІСТЕРІМЕН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Нугманов А.Б. – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, ауыл шаруашылығы ғылымдары факультетінің деканы, Қостанай қ., Қазакстан Республикасы.

Ысқақ А. – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, инновациялық технологиялар ғылыми-зерттеу институтының директоры, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазакстан Республикасы.

Бектұрғанова А.Қ.\* – химия мамандығы бойынша жаратылыстану ғылымдарының магистрі, биология, экология және химия кафедрасының аға оқытушысы, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазакстан Республикасы.

Иржанов Ж. – 8D05101 «Биология» ББ 2 курс докторанты, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ Қостанай қ., Қазакстан Республикасы.

Бұл жұмыс Қостанай облысы Рудный қаласына іргелес аумақтардан алынған топырақ үлгілеріндегі ауыр металдардың жалпы мөлшерін салыстырмалы талдауға арналған. Тау-кен өндіру кәсіпорындарының ұзақ мерзімді қызметіне байланысты қалыптасқан жоғары техногендік жүктеме жағдайында топырақтың жалпы элементтік құрамын анықтау әдістерін аспаптық верификациялау қоршаған орта ластану деңгейін кешенді бағалаудың маңызды құрамдас бөлігі болып табылады. Зерттеудің мақсаты – Fe, Zn, Cu, Ni, Pb, As, Cr және Co элементтерінің жалпы мөлшерін анықтау барысында рентгенфлуоресценттік спекторметрия (РФС) және индуктивті байланысқан плазмалы оптикалық-эмиссиялық спекторметрия (ИБП-ОЭС) әдістері нәтижелерінің сәйкестігі мен конвергенттілігін бағалау. Әдістемелік бөлімде топырақ үлгілерін  $\text{HNO}_3\text{-HCl}$  қышқылдық қоспасымен микротолқынды жүйеде минералдандыру және алынған ерітінділерді ИБП-ОЭС әдісімен талдау, сондай-ақ қатты фазалы үлгілерді РФС әдісімен тікелей зерттеу қарастырылды. Алынған дерек-