

Научная статья

Original article

УДК 631.1; 577.2

doi: 10.55186/2413046X_2025_10_11_249

ИННОВАЦИИ КЛЕТОЧНОГО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА США INNOVATIONS OF CELLULAR AGRICULTURE IN THE USA



Жиганова Лариса Петровна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института США и Канады Российской академии наук (ИСКРАН), Российская Федерация, 121069, Москва, Хлебный пер., д.2/3 (Larissa-Zhiganova@yandex.ru).

Zhiganova Larissa Petrovna, PhD in Biology, senior researcher, Institute of USA and Canada Studies, Russian Academy of Sciences (ISKRAN) 2/3 Khleby pereulok, Moscow, Russian Federation 121069, e-mail: Larissa-Zhiganova@yandex.ru

Аннотация. Клеточное сельское хозяйство предлагает альтернативы традиционному сельскому хозяйству и позволяет производить мясную и молочную продукцию без разведения и забоя животных. Разработки культивированного мяса уже подошли к этапу создания продуктов со сложной текстурой и вкусовыми качествами, которые приближаются к натуральным стейкам. Ключевыми проблемами новой отрасли сегодня является создание растительных каркасов (скаффолдов) для культивации мышечных клеток, чтобы воспроизводить архитектуру мышечных волокон, а также синтез эффективных и недорогих питательных сред без содержания фетальной бычьей сыворотки, которая является спорным компонентом с точки зрения этики, а ее высокая стоимость исключает применение в

промышленном масштабе. Прогнозы развития отрасли при сохранении существующих темпов развития технологий позволяет ожидать, что к 2040 году треть всего объема мяса может быть выращена без участия животных.

Abstract. Cellular agriculture offers alternatives to traditional farming, enabling the production of meat and dairy products without raising and slaughtering animals. Research into cultured meat has already reached the stage of creating products with complex textures and flavors approaching those of natural steaks. Key challenges in this emerging industry today include the creation of plant-based scaffolds for culturing muscle cells to replicate muscle fiber architecture, as well as the synthesis of effective and inexpensive nutrient media free of fetal bovine serum, a controversial ingredient from an ethical standpoint, and its high cost precludes industrial-scale use. Industry development forecasts, assuming current technological advancements continue, suggest that by 2040, one-third of all meat could be grown without the use of animals.

Ключевые слова: клеточное сельское хозяйство, культивируемое мясо, белковая инженерия, биореакторы, скаффолды

Keywords: cellular agriculture, cultured meat, protein engineering, bioreactors, scaffolds

Введение

Клеточное сельское хозяйство выступает альтернативой традиционному сельскому хозяйству, позволяя получить мясную, молочную продукцию, а также натуральные товары кожевенной промышленности с помощью методов клеточной инженерии и при этом минимизировать вредное воздействие на окружающую среду.

Инновационные биотехнологические методы используют непосредственно клетки культур организмов, что приводит к отказу от традиционного выращивания животных и получения от них продукции. Речь идет о тканевой инженерии, ферментации и синтетической биологии. Потребность в таких технологиях обусловлена ростом мирового спроса на

животный белок, беспокойством о состоянии окружающей среды, достижениями в области культивирования клеток и биопереработки. Активный рост инвестиций со стороны крупных корпораций в стартапы в сфере пищевых технологий ускоряют рост рынка и коммерциализацию по всему миру.

В среднесрочной перспективе в мире ожидается рост рынка клеточных технологий в сельском хозяйстве с 206,38 млрд долл США в 2024 г. до 946,38 млрд долл США к 2035 г. При этом среднегодовые темпы роста составят 16,45% в течение ближайших десяти лет. Наиболее быстрые темпы роста ожидаются в США за счет повышенного интереса инвесторов, прогресса совершенствования конструкций биореакторов и повышения масштабируемости производственных процессов. Так, например, в 2021 г. программа «Устойчивые сельскохозяйственные системы» (SAS) Министерства сельского хозяйства США и Национального института сельского хозяйства (NIFA) сделала знаковое вложение в исследования культивируемого мяса, предоставив Университету Тафтса грант в размере 10 миллионов долларов сроком на пять лет на создание Национального института клеточного сельского хозяйства – первого в США финансируемого государством центра исследований культивируемых белков [1].

Основные тренды развития клеточных технологий в сельском хозяйстве

Культивированное мясо

Современные технологии позволяют производить мясо из клеток животных без разведения и забоя скота. Сторонники метода аргументируют его востребованность и перспективность сокращением парниковых выбросов, а также тем, что потребитель получает безопасное мясо без содержания гормонов и антибиотиков. В рамках стартапов решаются такие задачи, как получение роста мягких тканей и дифференцировки специфичных клеток методами тканевой инженерии, созданием новых клеточных линий, улучшение текстуры и вкуса мяса, полученного

различными методами биосинтеза исходного материала. В ближайшие два-три года ожидается расширение производственной базы, что позволит поставлять на рынок сотни тонн гибридного мяса ежегодно [2,3].

Штаб-квартира крупнейшей биотехнологической компании, которая занимается производством культивированного мяса и белков на основе мицелия, в апреле 2025 г. была перенесена из Китая в Сан-Франциско с объемом инвестиций 20 млн долл США [4].

Также активно развивается производство гибридного мяса из растительных клеток на основе говяжьего миоглобина – это ингредиент, который улучшает текстуру и вкус растительного мяса, имитируя его натуральные свойства (компания-разработчик получила гранты на 1,25 млн долл на разработку питательных сред для культивации мяса путем ферментации и применения побочных продуктов сельского хозяйства). [5]. Свою миссию разработчики видят в ускорении перехода к производству мяса без участия животных. По прогнозам, к 2035 г. каждый десятый продукт мясной или молочный, яйцо будут производиться альтернативными методами [6]. Основная задача сегодняшнего дня – это увеличение объемов производства и снижение себестоимости. Так, стоимость килограмма культивируемого мяса упала с сотен тысяч долларов до нескольких сотен, что позволяет достичь в перспективе паритета с премиальными сортами традиционного мяса [7]. Еще одним элементом заметного прогресса в производстве культивированного мяса является тот факт, что амбиции разработчиков уже распространяются не столько на получение клеточного мясного фарша, сколько на продукты со сложной структурой, например, стейки [8,9]. Культивированное мясо уже получило законодательное одобрение со стороны регуляторных органов в США, а также в Сингапуре и Израиле. Как только этот процесс распространится на страны ЕС, Великобританию, Китай, доступ к клеточной мясной продукции откроется для миллиардов потребителей.

Гибридные продукты, созданные из смеси растительных и культивируемых компонентов, являются более доступной промежуточной ступенью от разработчика к потребителю. Разработка линий растительных клеток позволяет получать экологичные альтернативы мясу с низким содержанием жиров, отсутствием аллергенов и улучшенными питательными свойствами, благодаря использованию генетически модифицированных клеток и рекомбинантных белков. Инновационное направление «ПлантТек» PlantTech (Plant Technology – «растительные технологии») использует растения для получения белков. В него входят такие методики как децеллюляризация (Decellularization) растений, когда из растительных тканей (стеблей, листьев, плодов) удаляются все собственные клетки, а оставшийся пористый скелет растения, его внеклеточный матрикс, заселяют мышечными клетками; биосинтез растительных белков для последующей 3D-печати; формование и паттернирование (Patterning), при котором формируется специфическая микроструктура (например, параллельные канавки), и она направляет рост клеток, заставляя их выстраиваться в мышечные волокна.

В то время, как многие подходы к децеллюляризации сосредоточены на использовании животной мышцы в качестве исходного материала, именно децеллюляризованные растения являются наиболее перспективной технологией для конструирования скелетной мышечной ткани с сохранением трехмерной биологической архитектуры. Так, например, после децеллюляризации ряда фруктов и овощей, было установлено, что каркас зеленого лука обладает подходящей поверхностной топографией для формирования выровненных клеток скелетной мускулатуры [10].

Рентабельное масштабирование продуктов клеточного сельского хозяйства требует решения ключевых ограничений в основных областях исследований: источники клеток, питательные среды, каркасные биоматериалы и конструкция биореакторов.

В качестве альтернативы ведутся исследования пригодности клеток насекомых для использования в системах производства продуктов питания. По сравнению с культурами клеток млекопитающих или птиц, культуры клеток беспозвоночных требуют меньше ресурсов и более устойчивы к изменениям условий окружающей среды, так как они могут процветать в широком диапазоне температур, уровней pH и осмолярности. Изменения, необходимые для крупномасштабного производства, относительно просто достичь с клетками насекомых, включая иммортализацию, адаптацию к бессывороточным средам и суспензионное культивирование [11].

Создание каркасов (скаффолдов) для формирования текстуры
культивируемого продукта

Без растительных или синтетических 3D-нановолоконных каркасов или микроносителей, которые поддерживают рост культивируемых белков, создание цельных кусков мяса невозможно. Речь идет о, так называемых, пищевых каркасах или скаффолдах ACF (*Animal-Component-Free*, не содержащих компонентов животного происхождения). Они помогают имитировать текстуру мяса и улучшают адгезию клеток. В январе 2025 г. произошло объединение двух крупных американских компаний-разработчиков «Нексче Байо» (Nexture Bio) и «Матрикс Фуд Текнолоджиз» (Matrix Food Technologies, Inc) [12] для преодоления, в том числе, этого ключевого технологического барьера для коммерческого успеха культивируемого мяса, - а именно существующего на рынке огромного пробела в области пищевых скаффолдов ACF, не содержащих компонентов животного происхождения. Именно за счет скаффолдов, на которых клетки мышц и жира могут организоваться в сложную трехмерную структуру, возможно получить имитацию настоящего мяса с привычными для потребителя текстурой и вкусом. Используют такие вещества, как желатин [13], соевый и гороховый белок [14], белки из панцирей ракообразных, компоненты водорослей и мицелии грибов [13,14].

Для того, чтобы воспроизвести сложный вкус и питательную ценность нативного продукта также применяют метод со-культивирования, когда практикуют одномоментное выращивание мышечных клеток (миобластов), жировых клеток (адипоцитов) и иногда соединительной ткани (фибробластов). Это позволяет воссоздать не только текстуру, но и сочность, вкус и аромат настоящего мяса, которые во многом зависят от содержания жиров [15].

Несмотря на имеющиеся достижения, получить идеальную имитацию животного мяса пока не удастся. При анализе текстурного профиля сырых прототипов культивируемого мяса и свиной корейки значительных различий в текстурных показателях выявлено не было. Однако при сравнении образцов после приготовления (методом прожарки) прототип культивируемого мяса значительно отличался в худшую сторону по твердости и жёсткости/жевательности по сравнению с настоящей свининой [16].

Вместе с тем, американские разработчики уверены, что методы молекулярного фермерства и вертикальные биореакторы для производства рекомбинантных белков и факторов роста без использования животных компонентов для выращивания мяса сокращают затраты и время выхода итоговой продукции на рынок. При сохранении подобных темпов развития технологий, к 2040 г. треть всего объема мяса может быть выращена без участия животных [17].

Точная ферментация

Точная ферментация обеспечивает безопасное, масштабируемое и эффективное производство белков без использования животных компонентов с помощью генной инженерии микроорганизмов. Технология позволяет получать высокопродуктивные, высококачественные белки с заданным аминокислотным профилем и функциональными свойствами. Уже разработано производство молочного белка без использования животных компонентов и его применение для производства сыра [18]. Используются

модифицированные микроорганизмы для создания молочных белков, таких как сывороточный протеин и казеин, что позволяет получать сыр без лактозы, гормонов и антибиотиков с аутентичной текстурой и вкусом. Инновации в области прецизионной ферментации (точная ферментация с использованием микроорганизмов) и белковой инженерии ускоряют разработку и коммерциализацию альтернативных мясных, молочных и других сельскохозяйственных продуктов. Ведущие компании поддерживают этот переход и инвестируют в исследования и взаимные коллаборации. По мере развития нормативно-правовой базы клеточное сельское хозяйство, считается, сможет выйти на мировой продовольственный рынок.

Другим инновационным методом является получение протеинового порошка при помощи морских микроорганизмов, обитающих в Балтийском море. Они потребляют водород, углекислый газ, аммиак и кислород в биореакторах, вырабатывая при этом в качестве конечного продукта метаболизма белковый порошок золотистого цвета, похожий на молотую куркуму, с лёгким грибным привкусом. Протеиновый метаболит используют для получения возобновляемого мяса без животных компонентов и при этом с аутентичной текстурой и вкусом [19]. Многие ключевые компоненты сред для культивации клеток (например, специфические факторы роста) слишком дороги. Их также производят с помощью генетически модифицированных микроорганизмов (дрожжей, бактерий) при помощи точной ферментации.

Белковая инженерия

Инновации в производстве белка позволяют создавать альтернативные белки с улучшенной питательной ценностью, вкусом и текстурой. Используя редактирование генов, трёхмерные структуры, искусственный интеллект и большие данные, они оптимизируют выход продукции и сокращают количество отходов. На базе платформы искусственного интеллекта «Флориш» (Florish) [20] уже разработаны альтернативные растительные белки для создания экологичных альтернатив мясу. В этом году было

объявлено о коммерческом запуске калифорнийской компанией «Ширу» (Shiru) двух разработанных с помощью искусственного интеллекта ингредиентов для улучшения рецептур пищевых продуктов: «юПро» (uPro™) - структурированного белка для эмульгирования и текстурирования, и «Олео Про» (OleoPro™) — белковой альтернативы жирам для снижения содержания насыщенных жиров. Ингредиенты предназначены для немедленной интеграции в производственные процессы пищевой промышленности, а первоначальные объёмы производства ориентированы на удовлетворение массового спроса [21]. Французский стартап «Коре Биогенезис» (Core Biogenesis) создает рекомбинантные факторы роста на основе растений, используя модифицированные семена рыжика. Его технология синтеза олеозина обеспечивает масштабируемое и устойчивое производство белка для трёхмерного культивирования клеток и применения в производстве мяса [22].

Создание биореакторов

Основанные на искусственном интеллекте масштабируемые инновационные биореакторы с 3D-матрицами и датчиками позволяют снижать затраты, повышать продуктивность и оптимизировать производство продукции клеточного сельского хозяйства. В процессе синтеза клеточные типы организуются в структуру, аналогичную структуре животных тканей. Это позволяет воспроизвести сенсорные эффекты и пищевую ценность настоящего мяса в отличие от растительных аналогов. Ограничения технологии на сегодняшний день определяются высокими затратами, невысоким потребительским спросом и политикой регулирующих органов. Однако, применение инновационных биореакторов потенциально может сократить расходы на 90% [23]. Речь идет о переходе от плоских культур к суспензионным, то есть выращивание клеток не на плоскости, а во взвешенном состоянии в биореакторах с объемом в тысячи литров [24].

Вместо классического культивирования, когда все ингредиенты добавляются сразу, перфузионный метод предполагает постоянную подачу свежей среды и экстракцию отработанных веществ, что позволяет поддерживать высокую плотность клеток и значительно увеличивает продуктивность биореактора [25].

Бессывороточные среды

Компании, занимающиеся клеточным сельским хозяйством, испытывают острую потребность в ключевом ингредиенте, – это доступные в промышленных объемах питательные среды. На их долю приходится около 80% затрат при производстве мяса на основе целевых клеток. Технологии молекулярного фермерства на основе растений для производства доступных питательных сред, факторов роста и других белков, позволят «клеточному мясу» стать конкурентоспособным продуктом по цене, а также популярной альтернативой мясу животного происхождения. Растения используют в качестве биореакторов для получения белков [17,21].

Основные проблемы сывороточных сред (с использованием фетальной бычьей сыворотки – FBS) носят как этический, так и экономический характер, что делает поиск альтернативы актуальной задачей. Поскольку FBS получают из крови живых телят, извлекаемых из беременных коров во время забоя, использование сыворотки противоречит фундаментальному принципу культивируемого мяса – производству пищи без убийства животных. Сыворотка является чрезвычайно дорогим продуктом, и цена зависит от рыночных колебаний спроса и предложения в сельском хозяйстве. При этом для промышленного производства потребуются тысячи литров сыворотки, что создает барьер для масштабирования [26]. Также есть определенные риски безопасности в связи с непостоянным составом, потенциальным заражением прионами, бактериями, вирусами [27]. Именно поэтому разработка эффективных бессывороточных сред считается одним из

ключевых технологических барьеров, которые необходимо преодолеть для коммерческого успеха культивируемого мяса [28,29].

Заключение

Рынок клеточного сельского хозяйства стремительно трансформирует глобальную продовольственную систему, предлагая альтернативы традиционному животноводству. Под влиянием технологических достижений, экологических проблем и растущего потребительского спроса на продукцию с «чистой этикеткой» и без жестокого обращения с животными, этот сектор меняет подход к производству продуктов питания.

Современные технологии развиваются на стыке биологии, пищевой науки и генной и клеточной инженерии. Сегодня уже не стоит вопрос о возможностях. Акцент сместился на получение продукции, которая была бы дешевой, хорошего вкуса и в достаточном количестве. Прогресс в методах, особенно в создании скаффолдов и бессывороточных сред, является ключом к тому, чтобы культивируемая продукция, главным образом – мясная, стала реальной альтернативой для массового потребителя.

Переход от научных экспериментов к промышленному масштабу ставит задачу не просто создать продукт в лаборатории, а сделать его производство рентабельным и массовым. Снижение зависимости процессов от фетальной бычьей сыворотки (FBS), которая является дорогим, этически спорным и нестабильным по составу компонентом, – это еще одна амбициозная задача в стадии решения. Замена FBS на бессывороточные питательные среды на основе растительных или грибных гидролизатов перестает быть трендом и становится отраслевым стандартом.

Усилия разработчиков направлены на создание продукта, максимально приближенного к натуральному: если раньше создавали в основном фарш, то сейчас – это стейки, куриные грудки и филе рыбы с сложной структурой. Успех гарантирует применение инструментов синтетической биологии в сочетании с технологиями искусственного интеллекта для ускорения и

оптимизации процессов. После одобрения первых продуктов в США и Сингапуре компании активно работают над интеграцией в существующие пищевые системы и получением одобрений в странах ЕС, Великобритании.

Вместе с тем, для достижения широкого признания и успешной коммерциализации необходимо полностью решить проблемы, связанные с биоматериалами, масштабируемостью, себестоимостью, текстурой и вкусом, а также нормативными требованиями и безопасностью. Интеграция передовых биоматериалов, технологий и усовершенствованных биотехнологических процессов обладает потенциалом, способным совершить революцию в производстве сельскохозяйственных продуктов.

Список источников

1. Top 50 Cellular Agriculture Companies in Globe 2025: Statistics View by Spherical Insights & Consulting. June 2025. <https://www.sphericalinsights.com/blogs/top-50-cellular-agriculture-companies-in-globe-2025-statistics-view-by-spherical-insights-consulting>
2. CellX запустила завод клеточного мяса в Шанхае с прицелом на внешние рынки. Независимый портал для специалистов мясной индустрии «Мясной Эксперт». 10-08-2023. <https://meat-expert.ru/news/14661-cellx-zapustila-zavod-kletochnogo-myasa-v-shankhae-s-pritselom-na-vneshnie-rynki?ysclid=mfo1w9g8n462915963>
3. Specht L. An analysis of culture medium costs and production volumes for cultivated meat. The Good Food Institute. Feb 09, 2020 <https://gfi.org/wp-content/uploads/2021/01/clean-meat-production-volume-and-medium-cost>
4. CellX Expands into US Market with GRAS-Cleared Morel Mycelium and New Jerky Brand. April 03 2025. <https://vegconomist.com/fungi-mushrooms-mycelium/cellx-expands-us-market-gras-cleared-morel-mycelium-new-jerky-brand/>
5. Luyef R.D. Biotechnologies nabs \$1.25m to scale cell-cultivated meat production. 05-Dec-2024. <https://www.foodnavigator->

usa.com/Article/2024/12/05/cell-cultivated-meat-co-luyef-biotechnologies-raises-125m/

6. Morach B. et al. Food for Thought: The Protein Transformation/ March 24, 2021. <https://www.bcg.com/publications/2021/the-benefits-of-plant-based-meats>
7. Gerhardt C.F. et al. How Will Cultured Meat and Meat Alternatives Disrupt the Agricultural and Food Industry?. *Industrial Biotechnology* 16 (2020): 262-270. DOI:10.1089/ind.2020.29227.cge
8. Eom K.H., Jeong D., Choi J.Y., Gim G.M. et al. MSTN knockout enhances the production of MYOD1-mediated steak-type cultivated meat. *J Anim Sci Biotechnol.* 2025 Mar 11;16(1):41. doi: 10.1186/s40104-025-01173-1
9. Post M.J., Levenberg S., Kaplan D.L. et al. Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat. *Nat Food* 1, 403–415 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0112-z>
10. Cheng Y.W., Shiowski D.J., Ball R.L., Whitehead K.A. et al. Engineering Aligned Skeletal Muscle Tissue Using Decellularized Plant-Derived Scaffolds. *ACS Biomater Sci Eng.* 2020 May 11;6(5):3046-3054. doi: 10.1021/acsbiomaterials.0c00058
11. Rubio N.R., Fish K.D., Trimmer B.A., Kaplan D.L. Possibilities for Engineered Insect Tissue as a Food Source. *Front. Sustain. Food Syst.* 2019, 3:24. doi: 10.3389/fsufs.2019.00024
12. Nexture Bio Acquires Matrix Food Technologies, Inc. to increase offerings of animal-component-free enabling technologies. *World Post Reporter* <https://www.worldpostreporter.com/article/777583304-nexture-bio-acquires-matrix-food-technologies-inc-to-increase-offerings-of-animal-component-free-enabling-technologies>
13. MacQueen L.A., Alver C.G., Chantre C.O., Ahn S. et al. Muscle tissue engineering in fibrous gelatin: implications for meat analogs. *NPJ Sci Food.* 2019 Oct 21;3:20. doi: 10.1038/s41538-019-0054-8.

14. Fasciano S., Wheba A., Ddamulira C., Wang S. Recent advances in scaffolding biomaterials for cultivated meat. *Biomater Adv.* 2024 Sep;162:213897. doi: 10.1016/j.bioadv.2024.213897
15. Kang D.H., Louis F., Liu H., Shimoda H. et al. Engineered whole cut meat-like tissue by the assembly of cell fibers using tendon-gel integrated bioprinting. *Nat Commun.* 2021 Aug 24;12(1):5059. doi: 10.1038/s41467-021-25236-9
16. Murugan P., Yap W.S., Ezhilarasu H., Suntornnond R. et al. Decellularised plant scaffolds facilitate porcine skeletal muscle tissue engineering for cultivated meat biomanufacturing. *NPJ Sci Food.* 2024 May 3;8(1):25. doi: 10.1038/s41538-024-00262-1
17. Tiamat Sciences - Using Plants in Place of Bioreactors to Meet the Future Needs of Cellular Agriculture/ Protein Report, July 15, 2020 <https://www.proteinreport.org/articles/tiamat-sciences-using-plants-place-bioreactors-meet-future-needs-cellular-agriculture/>
18. Formo bags \$61 million in Series B funding - launches the world's first animal-free cheese made with Koji Protein. Health Capital. <https://www.healthcapital.de/en/news/article/formo-bags-61-million-in-series-b-funding-launches-the-worlds-first-animal-free-cheese-made-with-koji-protein/>
19. Watson E. Protein from air startup Solar Foods plans to go public. *AgFunderNews*, 07-18-2024. <https://agfundernews.com/protein-from-air-startup-solar-foods-plans-to-go-public>
20. Achard S. Shiru Launches Commercial Production of AI-Discovered uPro™ & OleoPro™ Ingredients. *IrgoNews*, 25th April 2025 <https://igrownnews.com/shiru-latest-news/>
21. Danley S. Shiru raises \$17 million to develop novel plant-based ingredients. *FoodBusinessnews* 27 Oct, 2021. <https://www.foodbusinessnews.net/articles/19918-shiru-raises-17-million-to-develop-novel-plant-based-ingredients>].

22. Ho S. French Startup Core Biogenesis Secures US\$3.1M To Scale Growth Factors For Cell-Based Meat. Green Queen, Dec 14, 2020 <https://www.greenqueen.com.hk/french-startup-core-biogenesis-secures-usd-3-1m-to-scale-growth-factors-for-cell-based-meat/>
23. Oberoi M. The Startup Trying to Solve the Lab-Grown Meat Industry's Woes: Will It Work?. Ark Biotech: Oct-04, 2024 <https://www.business2community.com/business-news/this-startup-is-trying-to-solve-the-lab-grown-meat-industrys-woes-will-it-work/>
24. Goodwin C.M., Aimutis W.R., Shirwaiker R.A. A scoping review of cultivated meat techno-economic analyses to inform future research directions for scaled-up manufacturing. Nat Food. 2024 Nov;5(11):901-910. doi: 10.1038/s43016-024-01061-3
25. Gome G., Chak B., Tawil S., Shpatz D. et al. Cultivation of Bovine Mesenchymal Stem Cells on Plant-Based Scaffolds in a Macrofluidic Single-Use Bioreactor for Cultured Meat. Foods. 2024 Apr 28;13(9):1361. doi: 10.3390/foods13091361
26. Messmer T., Klevernic I., Furquim C. et al. A serum-free media formulation for cultured meat production supports bovine satellite cell differentiation in the absence of serum starvation. Nat Food 3, 74–85 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00419->
27. van der Valk J. Fetal bovine serum-a cell culture dilemma. Science. 2022 Jan 14;375(6577):143-144. doi: 10.1126/science.abm1317
28. Subbiahanadar Chelladurai K., Selvan Christyraj J.D., Rajagopalan K., Yesudhason B.V. et al. Alternative to FBS in animal cell culture - An overview and future perspective. Heliyon. 2021 Jul 28;7(8):e07686. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07686
29. Stout A.J., Mirliani A.B., Rittenberg M.L. et al. Simple and effective serum-free medium for sustained expansion of bovine satellite cells for cell cultured meat. Commun Biol 5, 466 (2022). <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03423-8>

References

1. Top 50 Cellular Agriculture Companies in Globe 2025: Statistics View by Spherical Insights & Consulting. June 2025. <https://www.sphericalinsights.com/blogs/top-50-cellular-agriculture-companies-in-globe-2025-statistics-view-by-spherical-insights-consulting>
2. CellX запустит завод клеточного мяса в Шанхае с причеслом на внешние рынки. Независимый портал для специалистов мясной индустрии «Мясной Эксперт». 10-08-2023. <https://meat-expert.ru/news/14661-cellx-zapustila-zavod-kletochnogo-myasa-v-shankhae-s-pritselom-na-vneshnie-rynki?ysclid=mfo1w9g8n462915963>
3. Specht L. An analysis of culture medium costs and production volumes for cultivated meat. The Good Food Institute. Feb 09, 2020 <https://gfi.org/wp-content/uploads/2021/01/clean-meat-production-volume-and-medium-cost>
4. CellX Expands into US Market with GRAS-Cleared Morel Mycelium and New Jerky Brand. April 03 2025. <https://vegconomist.com/fungi-mushrooms-mycelium/cellx-expands-us-market-gras-cleared-morel-mycelium-new-jerky-brand/>
5. Luyef R.D. Biotechnologies nabs \$1.25m to scale cell-cultivated meat production. 05-Dec-2024. <https://www.foodnavigator-usa.com/Article/2024/12/05/cell-cultivated-meat-co-luyef-biotechnologies-raises-125m/>
6. Morach B. et al. Food for Thought: The Protein Transformation/ March 24, 2021. <https://www.bcg.com/publications/2021/the-benefits-of-plant-based-meats>
7. Gerhardt C.F. et al. How Will Cultured Meat and Meat Alternatives Disrupt the Agricultural and Food Industry?. Industrial Biotechnology 16 (2020): 262-270. DOI:10.1089/ind.2020.29227.cge
8. Eom K.H., Jeong D., Choi J.Y., Gim G.M. et al. MSTN knockout enhances the production of MYOD1-mediated steak-type cultivated meat. J Anim Sci Biotechnol. 2025 Mar 11;16(1):41. doi: 10.1186/s40104-025-01173-1

9. Post M.J., Levenberg S., Kaplan D.L. et al. Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat. *Nat Food* 1, 403–415 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0112-z>
10. Cheng Y.W., Shiowski D.J., Ball R.L., Whitehead K.A. et al. Engineering Aligned Skeletal Muscle Tissue Using Decellularized Plant-Derived Scaffolds. *ACS Biomater Sci Eng.* 2020 May 11;6(5):3046-3054. doi: 10.1021/acsbiomaterials.0c00058
11. Rubio N.R., Fish K.D., Trimmer B.A., Kaplan D.L. Possibilities for Engineered Insect Tissue as a Food Source. *Front. Sustain. Food Syst.* 2019, 3:24. doi: 10.3389/fsufs.2019.00024
12. Nexture Bio Acquires Matrix Food Technologies, Inc. to increase offerings of animal-component-free enabling technologies. *World Post Reporter* <https://www.worldpostreporter.com/article/777583304-nexture-bio-acquires-matrix-food-technologies-inc-to-increase-offerings-of-animal-component-free-enabling-technologies>
13. MacQueen L.A., Alver C.G., Chantre C.O., Ahn S. et al. Muscle tissue engineering in fibrous gelatin: implications for meat analogs. *NPJ Sci Food.* 2019 Oct 21;3:20. doi: 10.1038/s41538-019-0054-8.
14. Fasciano S., Wheba A., Ddamulira C., Wang S. Recent advances in scaffolding biomaterials for cultivated meat. *Biomater Adv.* 2024 Sep;162:213897. doi: 10.1016/j.bioadv.2024.213897
15. Kang D.H., Louis F., Liu H., Shimoda H. et al. Engineered whole cut meat-like tissue by the assembly of cell fibers using tendon-gel integrated bioprinting. *Nat Commun.* 2021 Aug 24;12(1):5059. doi: 10.1038/s41467-021-25236-9
16. Murugan P., Yap W.S., Ezhilarasu H., Suntornnond R. et al. Decellularised plant scaffolds facilitate porcine skeletal muscle tissue engineering for cultivated meat biomanufacturing. *NPJ Sci Food.* 2024 May 3;8(1):25. doi: 10.1038/s41538-024-00262-1

17. Tiamat Sciences - Using Plants in Place of Bioreactors to Meet the Future Needs of Cellular Agriculture/ Protein Report, July 15, 2020
<https://www.proteinreport.org/articles/tiamat-sciences-using-plants-place-bioreactors-meet-future-needs-cellular-agriculture/>
18. Formo bags \$61 million in Series B funding - launches the world's first animal-free cheese made with Koji Protein. Health Capital.
<https://www.healthcapital.de/en/news/article/formo-bags-61-million-in-series-b-funding-launches-the-worlds-first-animal-free-cheese-made-with-koji-protein/>
19. Watson E. Protein from air startup Solar Foods plans to go public. AgFunderNews, 07-18-2024. <https://agfundernews.com/protein-from-air-startup-solar-foods-plans-to-go-public>
20. Achard S. Shiru Launches Commercial Production of AI-Discovered uPro™ & OleoPro™ Ingredients. IrgoNews, 25th April 2025
<https://igrownnews.com/shiru-latest-news/>
21. Danley S. Shiru raises \$17 million to develop novel plant-based ingredients. FoodBusinessnews 27 Oct, 2021.
<https://www.foodbusinessnews.net/articles/19918-shiru-raises-17-million-to-develop-novel-plant-based-ingredients>].
22. Ho S. French Startup Core Biogenesis Secures US\$3.1M To Scale Growth Factors For Cell-Based Meat. Green Queen, Dec 14, 2020
<https://www.greenqueen.com.hk/french-startup-core-biogenesis-secures-usd-3-1m-to-scale-growth-factors-for-cell-based-meat/>
23. Oberoi M. The Startup Trying to Solve the Lab-Grown Meat Industry's Woes: Will It Work?. Ark Biotech: Oct-04, 2024
<https://www.business2community.com/business-news/this-startup-is-trying-to-solve-the-lab-grown-meat-industrys-woes-will-it-work/>
24. Goodwin C.M., Aimutis W.R., Shirwaiker R.A. A scoping review of cultivated meat techno-economic analyses to inform future research directions for

scaled-up manufacturing. Nat Food. 2024 Nov;5(11):901-910. doi: 10.1038/s43016-024-01061-3

25. Gome G., Chak B., Tawil S., Shpatz D. et al. Cultivation of Bovine Mesenchymal Stem Cells on Plant-Based Scaffolds in a Macrofluidic Single-Use Bioreactor for Cultured Meat. Foods. 2024 Apr 28;13(9):1361. doi: 10.3390/foods13091361

26. Messmer T., Klevernic I., Furquim C. et al. A serum-free media formulation for cultured meat production supports bovine satellite cell differentiation in the absence of serum starvation. Nat Food 3, 74–85 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00419->

27. van der Valk J. Fetal bovine serum-a cell culture dilemma. Science. 2022 Jan 14;375(6577):143-144. doi: 10.1126/science.abm1317

28. Subbiahanadar Chelladurai K., Selvan Christyraj J.D., Rajagopalan K., Yesudhasan B.V. et al. Alternative to FBS in animal cell culture - An overview and future perspective. Heliyon. 2021 Jul 28;7(8):e07686. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07686

29. Stout A.J., Mirliani A.B., Rittenberg M.L. et al. Simple and effective serum-free medium for sustained expansion of bovine satellite cells for cell cultured meat. Commun Biol 5, 466 (2022). <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03423-8>

© Жиганова Л.П., 2025. Московский экономический журнал, 2025, № 11.