

УДК 338.984

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕХОДА ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМОЕ СЫРЬЕ¹Н.А. Бондарева, ²Н.А. Замуруева, ¹Т.В. Нерушева¹ Орловский государственный аграрный университет им. Н. В. Парахина, Орел, e-mail: ilin26@yandex.ru, nerushevat@rambler.ru² Среднерусский институт управления – филиал РАНХиГС, Орел, e-mail: nat3011@yandex.ru

Аннотация. В условиях глобальной декарбонизации и истощения запасов традиционных углеводородов переход промышленности на возобновляемые источники сырья становится стратегическим приоритетом. Трансформация ресурсной базы рассматривается не только как экологическая необходимость, но и как инструмент повышения экономической устойчивости промышленных предприятий. Многие товары повседневного спроса, которые в современном обществе считаются само собой разумеющимися, например, пластмассы, фармацевтические препараты, химия, косметика и пищевые добавки, производятся из нефти. Дефицит будет означать, что в будущем эту продукцию придется производить на основе возобновляемого сырья, при этом центральную роль будут играть промышленные биотехнологии. С экономической точки зрения переход на возобновляемое сырьё открывает новые рыночные ниши, снижает зависимость от волатильных цен на нефть и создаёт предпосылки для формирования устойчивых цепочек поставок. По оценкам экспертов, мировой рынок биотехнологий к 2030 году может достичь 4 трлн долларов, а доля биооснованных продуктов в химической промышленности — вырасти до 35 %. В данной статье рассматриваются экономические предпосылки и организационные механизмы перехода промышленных предприятий на использование возобновляемого сырья. Актуальность исследования обусловлена необходимостью трансформации традиционных производственных моделей в условиях глобального дефицита не возобновляемых ресурсов и ужесточения международных экологических стандартов. Автором проведен сравнительный анализ экономической эффективности применения биомассы и вторичных ресурсов в сопоставлении с традиционным углеводородным сырьем.

Ключевые слова: возобновляемое сырьё, промышленная экономика, циркулярная экономика, устойчивое развитие, ресурсосбережение, биоэкономика, экономическая эффективность, инновационные технологии, рыночная конкурентоспособность, инвестиционная привлекательность.

ECONOMIC EFFICIENCY AND ORGANIZATIONAL MECHANISMS FOR INDUSTRY TRANSITION TO RENEWABLE RAW MATERIALS¹N.A. Bondareva, ²N.A. Zamurueva, ¹T.V. Nerusheva¹ N. V. Parakhin Oryol State Agrarian University, Oryol, e-mail: ilin26@yandex.ru nerushevat@rambler.ru² Central Russian Institute of Management – branch of RANEPa, Oryol, e-mail: nat3011@yandex.ru

Abstract. In the context of global decarbonization and the depletion of traditional hydrocarbon reserves, the industrial transition to renewable raw material sources is becoming a strategic priority. Resource transformation is viewed not only as an environmental imperative but also as a means of increasing the economic sustainability of industrial enterprises. Many everyday goods that are taken for granted in modern society, such as plastics, pharmaceuticals, chemicals, cosmetics, and food additives, are produced from oil. A shortage will mean that in the future, these products will have to be produced using renewable raw materials, with industrial biotechnology playing a central role. From an economic perspective, the transition to renewable raw materials opens up new market niches, reduces dependence on volatile oil prices, and creates the preconditions for the development of sustainable supply chains. Experts estimate that the global biotechnology market could reach \$4 trillion by 2030, and the share of biobased products in the chemical industry could grow to 35%. This article examines the economic prerequisites and organizational mechanisms for industrial enterprises' transition to the use of renewable raw materials. The relevance of this study stems from the need to transform traditional production models in the face of a global shortage of non-renewable resources and increasingly stringent international environmental standards. The author conducted a comparative analysis of the economic efficiency of using biomass and secondary resources compared to traditional hydrocarbon feedstocks.

Keywords: *renewable raw materials, industrial economy, circular economy, sustainable development, resource conservation, bioeconomy, economic efficiency, innovative technologies, market competitiveness, investment attractiveness.*

Вклад авторов: *все авторы внесли равный вклад в проведение исследования и написание статьи; выразили согласие нести публичную ответственность за все аспекты работы, связанные с точностью или достоверностью любой части рукописи; одобрили финальную версию статьи перед публикацией*

Конфликт интересов: *авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

Дата поступления статьи в редакцию: 24.05.2026

Дата принятия статьи в печать: 09.07.2026

Введение

В будущем с использованием биотехнологических процессов будет производиться гораздо больше повседневных продуктов. Чтобы сделать биогенное сырье и отходы доступными в качестве источника углерода и энергии для микроорганизмов, используемых в промышленной биотехнологии, разрабатываются энергетически и экологически безопасные процессы [3, 5]. Современные методы синтетической биологии делают эти организмы гибкими и эффективными «универсалами», метаболизм которых можно быстро перевести на использование субстратов из биомассы и производство новых химических соединений. В этом контексте важную роль будут играть специально разработанные ферменты, которые, будучи частью синтетических путей биосинтеза, в значительной степени определяют метаболические характеристики используемых микроорганизмов и, даже в изолированной форме, могут катализировать биотехнологические значимые реакции в более широком масштабе [9]. На этом пути еще предстоит преодолеть множество научных задач.

С точки зрения экономики, внедрение биотехнологий позволяет:

- снизить операционные затраты за счёт использования дешёвых субстратов (отходов сельского хозяйства, лигноцеллюлозы и т. д.);
- диверсифицировать источники сырья и уменьшить зависимость от колебаний цен на нефть;
- создать новые рабочие места в секторе биоэкономики;
- повысить конкурентоспособность продукции на международных рынках за счёт соответствия экологическим стандартам (ESG-критерии, углеродный след).

Современные методы синтетической биологии делают эти организмы гибкими и эффективными «универсалами», метаболизм которых можно быстро перевести на использование субстратов из биомассы и производство новых химических соединений. В этом контексте важную роль будут играть специально разработанные ферменты, которые, будучи частью синтетических путей биосинтеза, в значительной степени определяют метаболические характеристики используемых микроорганизмов и, даже в изолированной форме, могут катализировать биотехнологические значимые реакции в более широком масштабе. На этом пути ещё предстоит преодолеть множество научных задач.

Экономические драйверы перехода включают:

- рост спроса на биоразлагаемые материалы и «зелёную» химию;
- государственные субсидии и налоговые льготы для экологически ориентированных производств;
- ужесточение экологических норм (например, ограничения на использование одноразового пластика в ЕС);
- развитие рынков углеродных кредитов и торговли квотами на выбросы [1, 4].

Материалы и методы исследования

В основу данного исследования положен комплексный подход, сочетающий методы системного анализа, технико-экономического моделирования и сравнительного мониторинга рыночных показателей [6, 7].

1. Информационная база и источники данных. Для количественной оценки потребления нефти и доли её использования в материальном производстве (в частности, в Германии и в мире) были использованы статистические отчеты Международного энергетического агентства (IEA), данные Федерального статистического управления Германии (Destatis), а также аналитические обзоры отраслевых ассоциаций химической промышленности (VCI) [11]. Период исследования охватывает актуальные данные по объемам добычи и переработки углеводородов в сопоставлении с темпами роста биоориентированных секторов экономики.
2. Объекты исследования. В качестве основных объектов анализа рассматриваются технологические цепочки «белой биотехнологии», основанные на переработке возобновляемого сырья (лигноцеллюлоза, сахароза, крахмалсодержащие субстраты). Исследование фокусируется на двух группах продуктов:
 - Биомономеры и базовые химикаты: акриламид, пропандиол, органические кислоты.
 - Высокоценные продукты тонкой химии: аминокислоты (лизин, глутамат), витамины и фармацевтические белки.
3. Методология анализа. Для оценки потенциала замещения нефтехимических продуктов биотехнологическими аналогами применялись следующие методы:
 - Техничко-экономический анализ (ТЕА): оценка производственных затрат при переходе с химического катализа на ферментативный или микробный синтез.
 - Компаративный метод: сравнение энергоемкости и объема отходов (E-factor) в традиционных нефтехимических процессах и процессах промышленной биотехнологии.
 - Сценарное моделирование: прогнозирование влияния дефицита нефти на изменение структуры себестоимости полимеров и смазочных материалов [5, 10].
 - Анализ жизненного цикла (LCA) в части ресурсной эффективности: (упоминается в контексте минимизации использования ресурсов и разработки биоразлагаемых пластмасс) [1].
4. Классификация технологических процессов. В рамках исследования была проведена систематизация существующих биотехнологических производств по трем критериям успеха, указанным в теоретической части: глубина оптимизации ресурсов, степень замещения промежуточных стадий синтеза и инновационный потенциал создания новых групп продуктов [3, 9].

Результаты исследования

Предвидимый дефицит нефти фундаментально изменит производство энергии и мобильность людей. Необходимые технические и социальные корректировки не будут ограничиваться только этими двумя областями. В порой жарких дебатах по поводу энергетического перехода часто упускается из виду, что из 90 миллионов баррелей нефти, потребляемых во всем мире каждый день, по крайней мере, 10% используется не для производства энергии, а для производства материалов. В Германии она составляет даже 15%.

Промышленная биотехнология, часто называемая «белой биотехнологией», конкретно использует выделенные из них микроорганизмы или ферменты для преобразования возобновляемого сырья либо в основные элементы (биомономеры) для дальнейшей химической функционализации, либо непосредственно в высококачественные конечные продукты, например, белки, аминокислоты и т. д., а также «объемные» химикаты (основные химикаты с высокими требованиями к объему). Таким образом, промышленная биотехнология образует мост между разработкой возобновляемого сырья и рынком высококачественной химической продукции и продуктов тонкой химии. Сюда также входят новые инновационные продукты, например, различные биоразлагаемые пластмассы, смазочные материалы и растворители.

Современное состояние. Промышленная биотехнология уже является историей огромного успеха. Технологии и продукты промышленной биотехнологии уже используются для:

1. Минимизации использования ресурсов в существующих химических процессах с точки зрения используемых субстратов, требуемой энергии и образующихся отходов [4, 5].
2. Замены важных промежуточных стадий и основных строительных блоков химической промышленности, особенно в области тонкой, а также массовой химии, биотехнологическими продуктами [2, 8].

3. Разработки новых продуктов и групп продуктов, которые, например, делают возможными новые методы лечения [9].

Многочисленные продукты, которые в настоящее время производятся микробным или ферментативным способом в промышленных масштабах, включают, среди прочего, аминокислоты (например, глутамат, лизин), органические кислоты (например, лимонная кислота, молочная кислота), спирты (например, пропандиол), полимеры (например, акриламид), витамины (например, витамин С, рибофлавин), терпены (например, бета-каротин), различные антибиотики, фармацевтические белки (например, инсулин, интерфероны), а также ферменты для производства моющих средств и кормов [1].

Благодаря материальному использованию возобновляемого сырья промышленная биотехнология очень точно отвечает требованиям биоэкономики будущего [2].

Желаемые разработки и решения. Доступность и микробное использование возобновляемого сырья. Сегодня для микробиологического производства биотехнологических продуктов в основном используются легкоусвояемые сахара из сахаро- и крахмалосодержащих плодов некоторых культурных растений, таких как сахарный тростник, сахарная свекла, кукуруза или различные виды зерна. Учитывая растущий глобальный спрос на продукты питания, это фундаментально приводит к конфликту целей с производством продуктов питания, которого следует избегать любой ценой [1, 9]. В последнее время активизируются исследования по использованию лигноцеллюлозосодержащей биомассы в качестве возобновляемого сырья для промышленной биотехнологии. Помимо более низкой стоимости, основными преимуществами материалов, содержащих лигноцеллюлозу, является их хорошая и прямая доступность [5, 6].

Особый интерес здесь представляют биогенные остатки сельского хозяйства/ пищевого производства, деревообрабатывающей и бумажной промышленности, а также утилизация отходов. Быстрорастущие растения и древесина также становятся все более важными. Однако они должны быть нетребовательными с точки зрения качества почвы и требований к воде, чтобы не конкурировать за пахотные земли с культурами, используемыми для производства продуктов питания. Для оптимальной доступности биомассы этих растений классические методы селекции необходимо сочетать с современными биотехнологическими процессами [3, 7].

В последние годы было разработано множество физических, химических и биологических процессов предварительной обработки и последующего гидролиза лигноцеллюлозы. Они сильно различаются по затратам энергии, количеству используемых химикатов, чистоте получаемого субстрата и общему времени процесса [6, 10]. Важное значение имеет не только эффективное и ресурсосберегающее обеспечение лигноцеллюлозными компонентами, но и расширение спектра субстратов уже используемых в промышленности платформенных организмов, таких как *Escherichia coli*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Corynebacterium glutamicum*, *Aspergillus niger* или *Bacillus subtilis*. для эффективного использования, т.е. метаболизма, этих новых субстратов становятся. Потребность в исследованиях в этой области по-прежнему можно оценить, как очень высокую.

В целом следует отметить, что в будущем микробный метаболизм биомассы, содержащей лигноцеллюлозу, потребует децентрализованных концепций биопереработки, которые обеспечат оптимальную предварительную обработку биомассы и позволят напрямую интегрировать продукты биопереработки в различные производственные процессы в одном месте. В рамках таких концепций остаточные материалы можно было бы возвращать непосредственно в круговорот сельскохозяйственного сырья, а полезную фракцию использовать для переработки в биотехнологические продукты. Эта биотехнологически пригодная для использования часть биомассы также должна быть переведена в пригодное для хранения состояние, чтобы обеспечить непрерывную поставку на производственные мощности независимо от фаз вегетации [5, 7].

Одним из способов использования растительной биомассы является преобразование ее в синтез-газ. Сегодня синтез-газ, состоящий в основном из водорода и оксида углерода и используемый для химического синтеза различных соединений, производится преимущественно из нефти или угля. Биомасса также может быть преобразована в синтез-газ, который затем можно использовать, например, для производства метанола. Метанол затем можно было бы использовать в качестве источника углерода и энергии непосредственно для микробного производства биотехнологических продуктов. Однако процессы производства синтез-газа из биомассы, как правило, более сложны, чем из угля или нефти, поскольку биомасса имеет менее однородный состав.

Использование водорослей для производства вторсырья. Будучи первичными производителями, водоросли, могут производить промышленно важные основные строительные блоки в дополнение к биомассе из углекислого газа (CO_2), воды, солей и солнечного света. В то время как макроводоросли использовались в качестве источника для производства сахаров и желирующих агентов для пищевого сектора на протяжении десятилетий, микроводоросли, которые обычно включают как одноклеточные эукариотические водоросли, так и цианобактерии, как говорят, обладают огромным материальным и энергетическим потенциалом замещения ископаемых ресурсов.

Одним из преимуществ использования микроводорослей для производства ценных материалов является использование земель, непригодных для выращивания сельскохозяйственных культур. Кроме того, в отличие от обычных культурных растений, используемые микроводоросли не требуют пресной воды. Важным фактором для выращивания является достаточное снабжение организмов CO_2 . В то время как углекислый газ рассматривается как проблемный парниковый газ, который образуется в больших количествах при сжигании ископаемого топлива и накапливается в атмосфере, в биотехнологии водорослей он служит важным сырьем для биотехнологического производства. Однако содержание природного углекислого газа в воздухе или воде слишком низкое для достижения оптимального производства биомассы и ценного материала. В идеале необходимый для этого CO_2 поступает от энергетических, цементных или известковых заводов, тем самым расширяя углеродный цикл.

Немецкая экономика может выступать здесь, прежде всего, в качестве поставщика технологий, поскольку, согласно современному уровню знаний, климат Германии вряд ли позволяет экономически выгодно выращивать соответствующие микроводоросли для производства «массовых» химикатов. Однако по-прежнему существует значительная потребность в исследованиях в этой области, как с точки зрения организмов, так и с точки зрения технологии процессов. Разработка экономичных и эффективных фотобиореакторов остается серьезной проблемой, особенно в качестве основы для биоперерабатывающих заводов на основе водорослей, на которых может осуществляться совместное производство ценных материалов для использования материалов и энергии.

Микроорганизмы играют центральную роль в преобразовании возобновляемого сырья в высококачественную продукцию из-за их больших и разнообразных показателей метаболического синтеза. Сегодня некоторые организмы бактериальной платформы, дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* или грибы родов *Aspergillus* и *Penicillium*, постоянно подвергаются дальнейшему развитию с использованием методов геномной инженерии для эффективного использования субстрата и максимального образования продуктов (метаболическая инженерия). Необходимым условием для этой работы является то, что соответствующий организм очень хорошо изучен с точки зрения его физиологии и геномной регуляции.

Если раньше метаболические процессы рассматривались преимущественно изолированно, то сегодня ведется работа по пониманию организмов в целом. Эта отрасль наук о жизни, известная как системная биология, пытается использовать самые современные технологии (технологии «омики») для получения целостной картины всех регуляторных и метаболических процессов, от генома и транскриптома до протеома и флюксосома внутри организма. Благодаря синтетической биологии, целью которой является рациональное конструирование продуцирующих организмов посредством разработки модулей генетического синтеза, целенаправленное конструирование организмов стало существенной чертой современной биотехнологии [8-10].

Движущей силой этого развития является огромный технологический прогресс в расшифровке микробных геномов, которую теперь можно выполнить очень недорого и в течение нескольких дней. С другой стороны, создание индивидуальных модулей генетического синтеза теперь стало обычным делом и осуществляется на коммерческой основе. Несмотря на все эти достижения, метаболизм и регуляция даже у простых бактерий настолько сложны, что бактерии еще далеки от полного понимания. По этой причине ведется поиск новых продуцирующих организмов с минимальным генетическим составом. Генетические и физиологические свойства этих «минимальных» или «шасси» организмов должны быть полностью направлены на биотехнологическое производство, чтобы максимально эффективно превращать субстраты в продукты. Однако до этой цели еще далеко. Поэтому в ближайшие несколько лет более пер-

спективным будет последовательное расширение метаболических возможностей существующих сегодня организмов.

Организмы должны иметь возможность эффективно использовать как можно больше субстратов из возобновляемого сырья, такого как целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин. Для этого гены отдельных ферментов или целых метаболических путей других организмов функционально интегрируются в существующие.

Несмотря на все эти достижения, метаболизм и регуляция даже у простых бактерий настолько сложны, что бактерии еще далеки от полного понимания. По этой причине ведется поиск новых продуцирующих организмов с минимальным генетическим составом. Генетические и физиологические свойства этих «минимальных» или «шасси» организмов должны быть полностью направлены на биотехнологическое производство, чтобы максимально эффективно превращать субстраты в продукты. Однако до этой цели еще далеко. Поэтому в ближайшие несколько лет более перспективным будет последовательное расширение метаболических возможностей существующих сегодня организмов. Организмы должны иметь возможность эффективно использовать как можно больше субстратов из возобновляемого сырья, такого как целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин. Для этого гены отдельных ферментов или целых метаболических путей других организмов функционально интегрируются в существующий метаболизм. Вместе с системами поглощения, которые вводят новые субстраты в клетку, новые источники энергии и углерода должны стать пригодными для использования микроорганизмами. В этом контексте доступная геномная информация многочисленных микроорганизмов, грибов, растений и животных организмов оказывается источником новых генов (и, следовательно, новых ферментов с интересными свойствами).

Кроме того, новые технологии секвенирования ДНК («секвенирование следующего поколения») также открывают возможность секвенирования изолированной ДНК целых микробных сообществ из определенных сред обитания, таких как осадки сточных вод или пищеварительная система термитов, использующих древесину. С помощью этой исследовательской дисциплины, известной как метагеномика, можно использовать огромную сокровищницу ферментативной активности некультивируемых микроорганизмов.

Те же молекулярно-биологические методы, которые используются для расширения спектра субстратов биотехнологических интересных платформенных организмов, также используются для расширения спектра продуктов этих организмов. Возможность переноса путей биосинтеза от высших живых существ к микроорганизмам позволяет биотехнологически получать очень интересные с фармакологической точки зрения соединения, которые лишь в небольших количествах производятся естественными продуцентами. Наиболее яркими примерами здесь являются предшественники противомаларийного препарата артемизинина или цитостатического препарата паклитаксела (таксол). Оба предшественника производятся растениями только в очень небольших количествах, и теперь их можно производить биотехнологически с использованием микроорганизмов в более крупных масштабах. Таким образом, биотехнологический подход также помогает сохранить природные ресурсы, которые ранее использовались для получения натуральных веществ.

Помимо микроорганизмов, интенсивные работы ведутся также над культурами растительных клеток и тканей как возможными системами производства таких метаболитов. Помимо генетического переноса путей биосинтеза между различными организмами, методы синтетической биологии позволяют также конструировать совершенно новые пути биосинтеза, не существующие в природе. Это делает возможным индивидуальное производство новых химических веществ для широкого спектра применений.

Однако экспрессия отдельных генов других организмов часто представляет собой серьезную проблему. В частности, гены, которые были идентифицированы в экстремальных средах обитания в рамках метагеномных проектов, лишь в редких случаях могут быть экспрессированы с сохранением их нативной функции, поэтому в этом все еще существует большая потребность для исследований в этой области.

Для разработки новых производственных штаммов сейчас создается множество вариантов микроорганизма, которые затем приходится кропотливо культивировать и индивидуально охарактеризовать. Лишь недавно стали доступны флуоресцентные биосенсоры, которые позволяют сравнивать концентрации продуктов в отдельных клетках в результате генетической модифика-

ции. В сочетании с подходящим устройством, таким как проточный цитометр, который способен сортировать флуоресцентно меченные одиночные клетки, разработку штамма можно значительно ускорить и сделать более экономичной.

В будущем эти и другие методологические и технологические достижения откроют доступ к совершенно новым производственным организмам, которые смогут высокоэффективно преобразовывать субстраты из возобновляемого сырья в пока еще непредвиденное количество биотехнологических продуктов, например, в основные строительные блоки для пластиков на биологической основе.

Заключение

Таким образом, переход промышленности на возобновляемое сырьё — это не просто экологическая необходимость, но и стратегическое направление развития экономики. Промышленная биотехнология (белая биотехнология) предоставляет инструменты для:

- снижения зависимости от нефти в производстве материалов (не только энергии);
- создания замкнутых производственных циклов (циркулярная экономика);
- разработки новых продуктов с улучшенными свойствами (биоразлагаемые полимеры, высокоэффективные фармацевтические субстанции);
- эффективного использования вторичных ресурсов и отходов.

Ключевые технологические драйверы этого перехода включают:

- развитие синтетической и системной биологии для конструирования «идеальных» продуцирующих организмов;
- расширение спектра перерабатываемого сырья за счёт лигноцеллюлозы и микроводорослей;
- внедрение методов метагеномики для поиска новых ферментов и метаболических путей;
- автоматизацию и ускорение разработки штаммов с помощью биосенсоров и проточной цитометрии.

Экономическая эффективность такого перехода будет определяться:

- снижением стоимости сырья (использование отходов и непищевого сырья);
- сокращением энергоёмкости и объёма отходов (снижение Efactor);
- созданием новых рынков для биопродуктов с высокой добавленной стоимостью (фармацевтика, косметика, функциональные материалы)

Несмотря на значительные успехи, остаются серьёзные вызовы:

- необходимость снижения себестоимости процессов переработки лигноцеллюлозы;
- масштабирование производства микроводорослей в умеренном климате;
- преодоление сложностей экспрессии генов из экстремальных организмов;
- интеграция биоперерабатывающих мощностей в существующие промышленные кластеры.

Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на:

- разработке децентрализованных биоперерабатывающих концепций;
- создании экономичных фотобиореакторов для микроводорослей;
- совершенствовании методов метаболической инженерии для расширения субстратной специфичности микроорганизмов;
- оценке полного жизненного цикла биопродуктов (LCA) для подтверждения их экологической и экономической устойчивости.

Реализация этих направлений позволит не только снизить зависимость от ископаемых ресурсов, но и создать устойчивую биоэкономику будущего, сочетающую экономическую эффективность с экологической безопасностью.

Литература

1. Гельманова З.С., Жабалова Г.Г., Филатов А.В. Энергетический менеджмент: теория и практика. Алматы: Казах университеті, 2022. 186 с. EDN: STINXN.
2. Мазурова О.В. Современные технологии снижения энергоёмкости промышленных процессов: монография. М.: Техносфера, 2022. 214 с. EDN: RADPXA.
3. Чернышёва Ю.Г. Экономическая эффективность и финансовое состояние предприятия: методы анализа и оценки. Ростов-н/Д.: ЮФУ, 2022. 288 с. EDN: SNMFGP.

4. Kyeong Rok Choi, Sang Yup Lee. Systems metabolic engineering of microorganisms for food and cosmetics production // *Nature Reviews Bioengineering*. 2023. Vol. 1. P. 832-857. DOI: 10.1038/s44222-023-00076-y EDN: LHXPIR.
5. Fritzsche F.S.O., Dusny C., Frick O., Schmid A. Single Cell Analysis in Biotechnology, Systems Biology, and Biocatalysis // *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2012. Vol. 3. P. 129-155. DOI: 10.1146/annurev-chembioeng-062011-081056.
6. Kamm B., Kamm M. Industrial biotechnology for renewable chemicals and materials // *Current Opinion in Biotechnology*. 2020. Vol. 62. P. 138-146.
7. Lee J.W., Kim T.Y., Jang Y.S., Choi S., Lee S.Y. Systems metabolic engineering for chemicals and materials // *Trends in Biotechnology*. 2011. Vol. 29, No. 8. P. 370-378. DOI: 10.1016/j.tibtech.2011.04.001 EDN: ONETWR.
8. Rubakhin S.S., Lanni E.J., Sweedler J.V. Progress toward single cell metabolomics // *Current Opinion in Biotechnology*. 2013. Vol. 24, No. 1. P. 95-104. DOI: 10.1016/j.copbio.2012.10.021.
9. Stranneheim H., Lundberg J. Stepping stones in DNA sequencing // *Biotechnology Journal*. 2012. Vol. 7, No. 8. P. 1063-1073. DOI: 10.1002/biot.201200153 EDN: RJQVVF.
10. Wu M., Singh A.K. Single cell protein analysis // *Current Opinion in Biotechnology*. 2012. Vol. 23, No. 1. P. 83-88. DOI: 10.1016/j.copbio.2011.11.023.