

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МЕТАБОЛИЗМ И ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ МАГНИТНЫХ БИОСОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ ДРОЖЖЕВЫХ КЛЕТОК

© 2024

Беспалова С.В.¹, Легенький Ю.А.¹, Яицкий А.С.²

¹Донецкий государственный университет (г. Донецк, Российская Федерация)

²Самарский государственный социально-педагогический университет (г. Самара, Российская Федерация)

Аннотация. Исследовано повреждающее воздействие магнитной маркировки наночастицами магнетита и постоянного магнитного поля на жизнеспособность, метаболизм и магнитные свойства магнитомаркированных дрожжевых клеток, которые могут быть использованы как магнитоуправляемые биосорбенты с пассивными и активными механизмами биосорбции. Магнитные свойства магнитомаркированных клеток оценивались методом весов Фарадея. Показано, что магнитная восприимчивость магнитомаркированных клеток возрастает при увеличении концентрации железа, приходящегося на 1 клетку (C_{Fe}), и не изменяется в течение нескольких суток для клеток, культивируемых в постоянном магнитном поле и без постоянного магнитного поля. Повреждающее воздействие на жизнеспособность исследуемых дрожжевых клеток оценивалось по разности относительной доли живых клеток в популяции в начале и конце их культивирования. Количество живых клеток оценивалось методом окрашивания метиленовым синим и подсчетом окрашенных клеток в камере Горяева. Показано, что повреждающее воздействие магнитной маркировки в исследованном диапазоне C_{Fe} не зависит от C_{Fe} при культивировании без постоянного магнитного поля и возрастает с увеличением C_{Fe} при культивировании в постоянном магнитном поле. Метаболизм магнитомаркированных клеток оценивали по выходу протонов из дрожжевых клеток в ходе переработки ими глюкозы (тест подкисления). Показано, что магнитная маркировка снижает интенсивность выхода протонов из клетки не более чем на 30%. Таким образом, в данной работе показано, что при использовании магнитной маркировки наночастицами магнетита можно получать жизнеспособные дрожжевые клетки с парамагнитной восприимчивостью. Такие магнитомаркированные клетки можно использовать как магнитоуправляемые биосорбенты, которые могут осуществлять пассивную и активную биосорбцию токсикантов и при этом эффективно отделяться с помощью магнитных сепараторов от очищаемой среды.

Ключевые слова: влияние магнитного поля; магнитная модификация; магнитные наночастицы магнетита; дрожжевые клетки; биосорбент.

THE EFFECT OF A CONSTANT MAGNETIC FIELD ON THE METABOLISM AND VIABILITY OF MAGNETIC BIOSORBENTS BASED ON YEAST CELLS

© 2024

Bespalova S.V.¹, Legenkiy Yu.A.¹, Yaitsky A.S.²

¹Donetsk State University (Donetsk, Russian Federation)

²Samara State University of Social Sciences and Education (Samara, Russian Federation)

Abstract. The damaging effect of magnetic labeling with magnetite nanoparticles and a permanent magnetic field on the viability, metabolism and magnetic properties of magnetically labeled yeast cells, which can be used as magnetically controlled biosorbents with passive and active biosorption mechanisms, has been studied. The magnetic properties of magnetically labeled cells were evaluated using the Faraday scale method. It has been shown that the magnetic susceptibility of magnetically labeled cells increases with an increase in the concentration of iron per 1 cell (C_{Fe}) and does not change for several days for cells cultured in and without permanent magnetic field. The damaging effect on the viability of the studied yeast cells was assessed by the difference in the relative proportion of living cells in the population at the beginning and end of their cultivation. The number of living cells was estimated by methylene blue staining and counting of stained cells in the Goryaev chamber. It is shown that the damaging effect of magnetic labeling in the studied C_{Fe} range does not depend on C_{Fe} when cultivated without permanent magnetic field and increases with increasing C_{Fe} when cultivated in permanent magnetic field. The metabolism of magnetically labeled cells was assessed by the release of protons from yeast cells during their glucose processing (acidification test). It has been shown that magnetic labeling reduces the intensity of proton release from the cell by no more than 30%. Thus, in this work it is shown that using magnetic labeling with magnetite nanoparticles, it is possible to obtain viable yeast cells with paramagnetic susceptibility. Such magnetically labeled cells can be used as magnetically controlled biosorbents that can carry out passive and active biosorption of toxicants and at the same time effectively separate using magnetic separators from the cleaned medium.

Keywords: magnetic field effect; magnetic modification; magnetic magnetite nanoparticles; yeast cells; biosorbent.

Введение

Загрязнение сточных вод тяжелыми металлами является серьёзной экологической проблемой, поскольку тяжелые металлы не разлагаются биологическим пу-

тем и могут накапливаться в живых тканях. Повышение уровня содержания тяжелых металлов в водной системе из-за неполной очистки промышленных сточных вод существующими традиционными методами

усугубляет эту экологическую проблему. Поэтому растет интерес к возможности использования биологических методов очистки, в частности биосорбции. Биосорбция является одним из перспективных биологических методов очистки сточных вод [1]. В основе биосорбции лежит возможность микроорганизмов адсорбировать катионы различных металлов. Из литературных источников известно, что сорбционными свойствами обладают как живые, так и мертвые микроорганизмы. Биосорбция, использующая живые или мертвые микроорганизмы, стала экономически эффективным методом очистки сточных вод. Среди многообразия микроорганизмов, способных к биосорбции тяжелых металлов, наибольший интерес представляют дрожжи, так как их применение оправдано экономически. В перспективе они могут применяться для решения ряда экологических проблем, таких, например, как очистка сточных вод или биоремедиация загрязненных почв и т.д. К наиболее перспективным для использования в качестве биосорбента относятся дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* [2].

Механизмы и эффективность биосорбции дрожжевых клеток зависят от целого ряда условий сорбции и, в частности, от состояния (живые/мертвые) и метаболизма дрожжевых клеток. Биосорбция ионов металла дрожжевыми клетками может происходить двумя способами: пассивным и активным. Мертвые клетки сорбируют токсиканты только за счет пассивных механизмов. Для живых клеток характерно наличие многостадийности процесса сорбции за счет возможности осуществления как пассивных (быстрых), так и активных (более медленных, связанных с метаболизмом) механизмов. При пассивной биосорбции, которая характерна и для мертвых, и для живых клеток, положительно заряженные ионы металла адсорбируются на клеточной стенке дрожжей за счет наличия на ней отрицательных зарядов, взаимодействуя с функциональными группами, такими как карбоксильная ($-\text{COOH}$), фосфатная ($-\text{PO}_4^{3-}$), гидроксильная ($-\text{OH}$) и некоторыми другими [3]. Протекание этой стадии сорбционного процесса не зависит от метаболизма клеток и происходит благодаря одному или нескольким из следующих механизмов связывания ионов металла:

- комплексообразование (образование соединений из простых молекул, при котором не образуются новые электронные пары);
- ионный обмен (процесс стехиометрического обмена ионами между двумя контактирующими фазами);
- физическая адсорбция (процесс концентрирования вещества из объема фаз на границе их раздела).

Способность к пассивной биосорбции присуща как живым, так и мертвым клеткам микроорганизмов. Для живых клеток после первого этапа быстрой пассивной биосорбции наблюдается более медленный второй этап теперь уже активной биосорбции, на котором происходит проникновение ионов металла внутрь клетки или их связывание с определенными поверхностными структурами (например, экзополисахаридами) [4, р. 303–305]. При этом может происходить внутриклеточная биоаккумуляция металлов, связанная с активным и пассивным транспортом катионов металлов и локализация металлов в различных компартментах клетки [5].

Следовательно, процесс сорбции ионов тяжелых металлов для живых клеток состоит из двух фаз: пас-

сивной сорбции ионов на поверхности клетки и специфического связывания с внешними или внутренними структурами клеток. Продолжительность первой фазы составляет несколько минут, а продолжительность второй – несколько часов, к тому же вторая фаза является энергоемкой. После проникновения в клетку ионы связываются с белками цитоплазмы и внутренними мембранными структурами или образуют нерастворимые продукты. Активная сорбция, или биоаккумуляция, характерна лишь для живых клеток и зависит от их метаболической активности [5]. В частности, в работе «Использование биомассы микроорганизмов для извлечения тяжелых металлов из сточных вод» [6, с. 61] показано, что через 24 часа при температуре $+29^\circ\text{C}$ концентрация тяжелых металлов в модельных средах при использовании в качестве сорбента живых клеток *Saccharomyces cerevisiae* снижается более интенсивно, чем при использовании в качестве сорбента сухих (мертвых) дрожжей. Таким образом, живые жизнеспособные клетки с активным метаболизмом обладают более высокими сорбционными свойствами, чем мертвые.

Несмотря на хорошие адсорбционные свойства и производительность биосорбентов на основе дрожжевых клеток, активному применению биосорбции препятствуют некоторые проблемы. Одной из таких проблем является сложность отделения отработанных биосорбентов от очищаемых водных объектов [7]. Для преодоления такой проблемы можно использовать магнитомодифицированные дрожжи. Магнитная модификация дрожжевых клеток или других биосорбентов производится за счет их магнитной маркировки магнитными наночастицами (например, наночастицами оксидов железа). Магнитные биосорбенты продемонстрировали улучшенные показатели биосорбции по сравнению с немагнитной биомассой [8, с. 99–100]. Применение магнитной сепарации для отделения магнитомодифицированных микроорганизмов после адсорбции ими ионов тяжелых металлов, в совокупности с технологией восстановления адсорбционных свойств таких микроорганизмов, обеспечивает более высокую эффективность их использования по сравнению с другими методами их сепарации от отфильтрованной среды (например, осаждением или фильтрацией) и используется в методах очистки сточных вод. Для эффективной сепарации магнитных сорбентов важнейшим их параметром является магнитная восприимчивость, которая сама зависит от условий магнитной маркировки клеток. Поэтому исследование влияния условий магнитной маркировки и культивирования на жизнеспособность и магнитную восприимчивость магнитомаркированных клеток являются актуальными.

Важным свойством микроорганизмов как биосорбентов является то, что живые клетки с активным метаболизмом (в отличие от мертвых) могут сорбировать большее количество токсикантов за счет постепенной выработки дополнительных защитных механизмов, предохраняющих клетки от повреждающего действия определенных токсикантов [9, р. 2972–2973]. Как указано в статье «Исследование возможности использования дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*) в качестве биосорбента тяжелых металлов из промышленных сточных вод» [10, с. 110], такая дополнительная сопротивляемость живых клеток возникает либо как

следствие многократных пересевов при возрастающей концентрации катионов металла, либо прямо при первичном культивировании клеток в средах, содержащих ионы тяжелых металлов. Вначале присутствие повышенных концентраций ионов металла вызывает стресс, уменьшение жизнеспособности и замедление роста дрожжей. Через некоторое время включаются защитные механизмы в клетках, и рост дрожжей возобновляется. При этом восстанавливается жизнеспособность и метаболизм клеток, а также увеличивается их сорбционная способность за счет активных механизмов сорбции [10, с. 110].

Считается, что одним из достоинств как нативных, так и, по-видимому, магнитомаркированных дрожжей, является то, что они используют широкий спектр механизмов детоксикации тяжелых металлов и проявляют высокую сорбционную активность по отношению к тяжелым металлам [10, с. 110–111]. Поэтому дрожжевые магнитомаркированные клетки, которым придали парамагнитные свойства с помощью магнитной маркировки магнитными наночастицами для эффективной магнитной сепарации, успешно применяются в экологии [8, с. 100]. При этом магнитная сепарация магнитомодифицированных клеток неразрывно связана с приложением внешнего магнитного поля, с помощью которого происходит управление их движением и свойствами. После сепарации можно восстановить сорбционные свойства магнитных биосорбентов если они сохраняют жизнеспособность и метаболическую активность, поэтому исследования цитотоксического действия комбинации магнитного поля и магнитных наночастиц являются актуальными. Необходимо учесть, что магнитные наночастицы, иммобилизованные на поверхности и (или) внутри клеток, во внешнем магнитном поле являются сами источником сильных градиентных магнитных полей, которые оказывают значительное силовое воздействие на магнитомаркированные клетки и их органеллы и могут приводить к негативному влиянию на их жизнеспособность [11]. Чаще всего постоянное магнитное поле снижает жизнеспособность и метаболическую активность клеток, магнитомаркированных магнитными наночастицами [12, с. 9404, 9407–9412]. Однако существуют и статьи, в которых показано, что приложение постоянного магнитного поля в присутствии магнитных наночастиц стимулирует поглощение наночастиц и размножение дрожжевых клеток [13]. В целом можно отметить, что проблема возможного цитотоксического эффекта при воздействии комбинации постоянного магнитного поля и магнитных наночастиц в научной литературе освещена недостаточно. Поэтому вопросы, связанные с комбинированным действием магнитного поля и магнитных наночастиц, требуют дополнительных исследований.

Цель данной работы – исследовать влияние постоянного магнитного поля и условий магнитомаркирования на магнитную восприимчивость, жизнеспособность и метаболизм магнитомаркированных дрожжевых клеток. Все указанные параметры существенно влияют на эффективность применения магнитомаркированных дрожжей в качестве потенциальных, магнитоуправляемых биосорбентов.

Объект исследования – пекарские дрожжи, которые имеют применение в качестве дешевых и эффективных адсорбентов ионов тяжелых металлов.

Материалы и методика исследований

Для магнитной маркировки клеток в данной работе использовали магнитные наночастицы магнетита, синтезированные по методике, представленной в работе «Магнитофоретические свойства фетальных фибробластов человека, маркированных суперпарамагнитными наночастицами оксида железа, стабилизированными цитратом» [14, с. 48]. Концентрацию железа в полученном коллоиде магнитных наночастиц определяли с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии.

Магнитную модификацию дрожжевых клеток проводили следующим образом: к 2 мл отмытой дрожжевой суспензии вносили феррожидкость в объемах, которые обеспечивали следующие концентрации наночастиц магнетита (в пересчете на количество Fe, приходящегося на одну клетку): $C_{Fe} = 1,5$ пг, 3 пг, 5 пг и 6,5 пг Fe на клетку. Процедура магнитомаркирования проводилась в течение 10 минут при постоянном перемешивании. После магнитной модификации клетки отмывались физиологическим раствором и использовались в дальнейших экспериментах.

Культивирование дрожжей проводили на питательной среде Чапека, рост клеток оценивали с помощью счетного метода с использованием камеры Горяева. В качестве источника магнитного поля, где происходило культивирование дрожжевых клеток, использовалась магнитная система из постоянных магнитов, создающая в центре системы постоянное однородное магнитное поле, с величиной магнитной индукции B , равной 0,2 Тл.

Оценку магнитных свойств клеток до и после воздействия постоянным магнитным полем в течение всего цикла развития дрожжевых популяций проводили методом «весов Фарадея» [15, с. 336], отбирая необходимые пробы в 0, 24 и 48 часов культивирования.

Для оценки изменения жизнеспособности клеток в течение развития их популяций использовали показатель ΔL , определяемый следующей формулой:

$$\Delta L = L_0 - L_1 (1),$$

где ΔL – изменение жизнеспособности клеток в течение развития их популяции; L_0 – доля живых клеток в начале культивирования клеток, выраженная в %; L_1 – доля живых клеток в конце культивирования клеток, выраженная в %.

Оценку жизнеспособности дрожжевых клеток проводили с помощью метода прижизненного окрашивания клеток метиленовым синим с подсчетом количества живых и мертвых клеток в камере Горяева. Метаболизм дрожжевых клеток оценивали с помощью теста «силы подкисления» [16]. В основе теста «силы подкисления» лежит определение уровней спонтанного и индуцированного снижения внеклеточного водородного показателя pH дрожжевой суспензии. Уровень спонтанного снижения внеклеточного pH отражает запас гликогена в клетке, а уровень индуцированного (добавлением глюкозы) снижения внеклеточного pH зависит от протекания гликолитического пути в метаболизме дрожжевых клеток. Показатель снижения внеклеточной кислотности ΔpH определялся по формуле:

$$\Delta pH = pH_0 - pH_{25} (2),$$

где pH_0 – величина водородного показателя суспензии дрожжевых клеток в первую минуту измерения; pH_{25} – величина водородного показателя суспензии дрожжевых клеток на 25-й минуте проведения теста.

Результаты исследований и их обсуждение

В результате магнитной маркировки с разной внеклеточной концентрацией магнитных наночастиц в среде культивирования (1,5 пг, 3 пг, 5 пг и 6,5 пг Fe на клетку) были получены популяции магнитомаркированных дрожжевых клеток с различной магнитной восприимчивостью. Величину магнитной восприимчивости полученных популяций магнитомаркированных клеток измеряли методом «весов Фарадея», отбирая пробы из культивируемых в магнитном поле и без магнитного поля суспензий в 0, 24 и 48 часов культивирования.

На рис. 1 представлены результаты измерения магнитной восприимчивости популяций дрожжевых клеток, магнитомаркированных с различным содержанием наночастиц в среде магнитомаркирования C_{Fe} , в зависимости от времени культивирования. Данные, приведенные на рис. 1, получены для популяций, культивируемых без магнитного поля. Для популяций, культивируемых в магнитном поле, получены аналогичные результаты, которые не приведены на графиках рис. 1, чтобы не загромождать рисунок.

Анализ данных по измерению магнитной восприимчивости магнитомаркированных клеток дрожжей, представленных на рис. 1, показал, что магнитная восприимчивость клеток после магнитной маркировки изменилась с диамагнитной на парамагнитную. При этом она пропорциональна внеклеточной концентрации магнитных наночастиц в среде магнитомаркирования C_{Fe} . Исследования показали, что магнитная восприимчивость магнитомаркированных клеток сохранялась на протяжении 48 часов развития популяций как для магнитомаркированных популяций, развивающихся в магнитном поле, так и для магнитомаркированных популяций, развивающихся без магнитного поля.

После процедуры магнитной маркировки с помощью теста «силы подкисления» была проведена оценка влияния магнитной маркировки на метаболическую активность дрожжевых клеток, от которой зависит наличие механизмов активной сорбции токсикантов магнитомаркированными клетками (рис. 2). На рис. 2 (А) представлена зависимость показателя ΔpH , рассчитанного по формуле 2, от C_{Fe} . При построении диаграммы на рис. 2 (А) проведена нормировка на ΔpH нативной суспензии дрожжей.

На рис. 2 (Б) представлены нормированные на значение pH_{10} зависимости индуцированного глюкозой подкисления межклеточной среды от времени для нативной и магнитомаркированных суспензий. pH_{10} – величина водородного показателя, измеренная на 10-й минуте проведения теста «силы подкисления», сразу после добавления глюкозы в исследуемую суспензию дрожжевых клеток.

Из анализа данных, представленных на рис. 2 (Б), можно сделать вывод об отсутствии значительного ингибирующего влияния магнитных наночастиц на индуцированное глюкозой подкисление среды дрожжами в исследованном диапазоне C_{Fe} . Из анализа рис. 2 (А) видно, что общий показатель ΔpH на этапах спонтанного и индуцированного подкисления снижается не более чем на 30%.

На рис. 3 представлены данные по изменению жизнеспособности, оцениваемой по параметру ΔL (см. формулу 1), популяций дрожжевых клеток (как нативных,

так и магнитомаркированных при разных C_{Fe}) на 5-й день культивирования в постоянном магнитном поле и без него.

Из анализа рис. 3 видно, что магнитная маркировка при развитии популяций без магнитного поля не повлияла на параметр ΔL в пределах погрешности эксперимента. Для клеток, культивируемых в магнитном поле, из рис. 3 видно, что показатель ΔL для нативных клеток (то есть при $C_{Fe} = 0$ пг на клетку) остается неизменным и несколько увеличивается с увеличением C_{Fe} , значит, наблюдается уменьшение доли живых клеток. Данный факт показывает наличие негативного влияния на жизнеспособность дрожжевых клеток при совместном действии постоянного магнитного поля и магнитных наночастиц. Но при этом, из сопоставления данных, представленных на рис. 1–3, можно отметить, что уменьшение доли жизнеспособных клеток, обладающих активными механизмами биосорбции, остается достаточно низким даже после использования при магнитной маркировке больших концентраций наночастиц, обеспечивающих магнитную восприимчивость магнитомаркированных клеток, большую 0,001, необходимую для эффективной магнитной сепарации этих клеток от очищаемой среды. Кроме того, полученные в настоящей работе данные по сохранению магнитных свойств исследуемых магнитомаркированных клеток на протяжении нескольких дней, показывают отсутствие разрушения магнитных наночастиц, захваченных клетками, а следовательно, и отсутствие выхода большого количества ионов железа во вне- и внутриклеточное пространство, которые могли бы повреждать биологически важные органеллы и приводить к гибели магнитомаркированных клеток.

Совместное влияние постоянного магнитного поля и магнитных наночастиц на жизнеспособность дрожжевых клеток было обнаружено для всех исследованных в настоящей работе концентраций магнитных наночастиц. Механизм, объясняющий негативный эффект при совместном действии магнитного поля и магнитных наночастиц, достоверно неизвестен. Повышение цитотоксичности магнитных наночастиц при инкубации магнитомаркированных клеток в магнитном поле можно объяснить значительной агрегацией наночастиц в присутствии магнитного поля, ведущее к блокировке мембранных и клеточных процессов, что тем самым приводит к нарушению мембранного транспорта и метаболизма клеток, а следовательно, и к их гибели. Схожий механизм был предложен в статье, в которой изучалось действие постоянного магнитного поля на клетки с магнитными наночастицами [12].

Выводы

Таким образом, в данной работе показано, что при использовании магнитной маркировки нативных дрожжевых клеток наночастицами магнетита, можно получать жизнеспособные дрожжевые клетки с объемной магнитной восприимчивостью большей, чем 0,001. Такие магнитомаркированные клетки можно использовать как магнитоуправляемые биосорбенты, которые после пребывания в магнитных полях магнитных сепараторов с индукцией порядка 0,2 Тл остаются достаточно жизнеспособными, чтобы проявлять процессы активного метаболизма и, следовательно, могут осуществлять и пассивную биосорбцию, и/или активную биоаккумуляцию ионов тяжелых металлов и других токсических веществ.

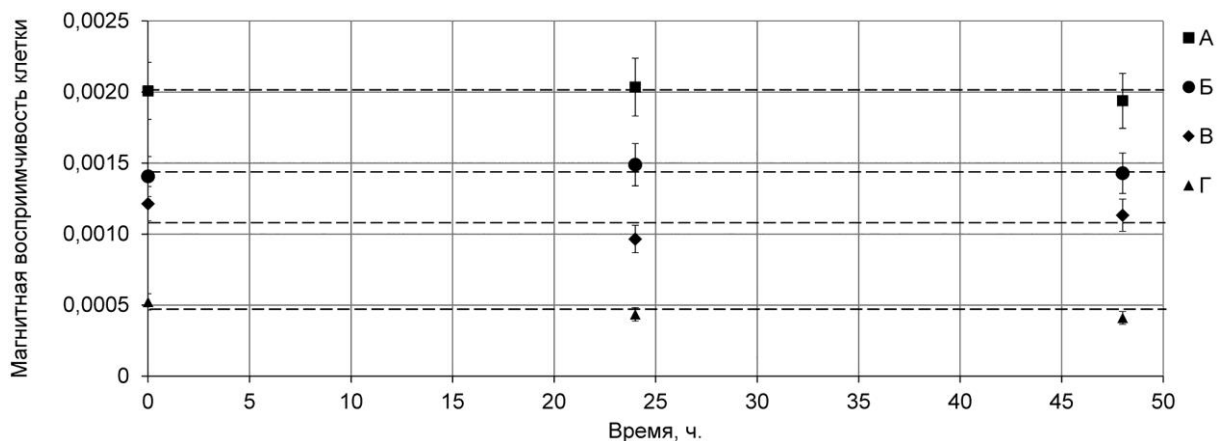


Рисунок 1 – Зависимости магнитной восприимчивости популяций магнитомаркированных дрожжевых клеток от времени культивирования. Шифр названия проб: А – $C_{Fe} = 6,5$ пг на клетку, Б – $C_{Fe} = 5$ пг на клетку, В – $C_{Fe} = 3$ пг на клетку, Г – $C_{Fe} = 1,5$ пг на клетку

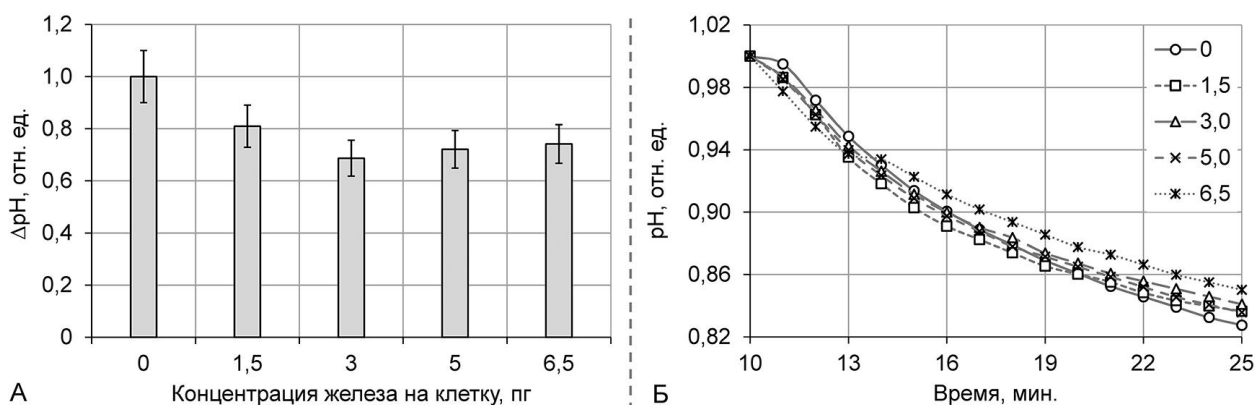


Рисунок 2 – Влияние магнитной маркировки на метаболизм дрожжевых клеток.

А – зависимость нормированного показателя ΔpH от количества Fe, приходящегося на 1 клетку при магнитной маркировке; Б – нормированные кривые индуцированного подкисления межклеточной среды для нативной и магнитомаркированных суспензий, полученных при разных C_{Fe} , указанных в легенде

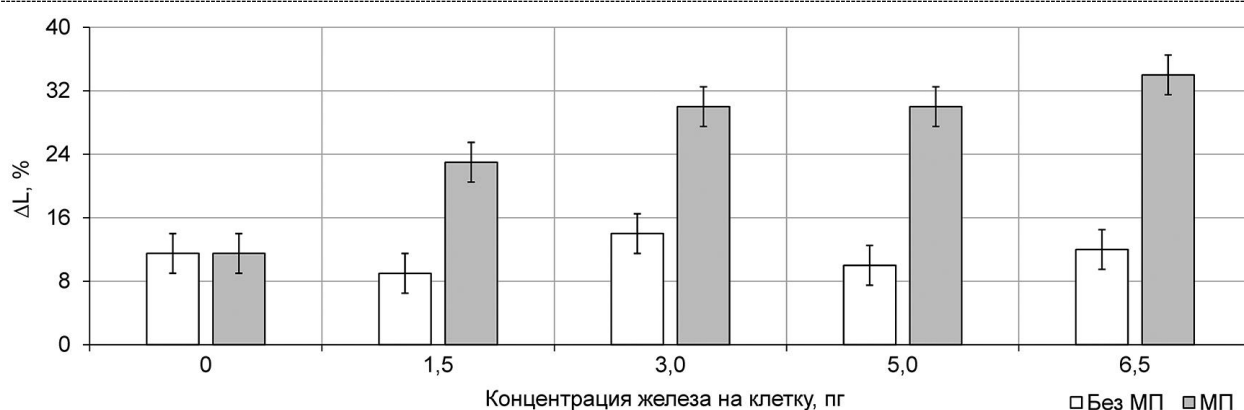


Рисунок 3 – Изменение жизнеспособности клеток ΔL , маркированных при разных концентрациях железа на клетку C_{Fe} и разных условиях культивирования (Без МП – без магнитного поля, МП – в магнитном поле), на 5-й день культивирования

Список литературы:

1. Balintova M., Estokova A. Materials for heavy metals removal from waters // Materials. 2024. Vol. 17, iss. 9. DOI: 10.3390/ma17091935.
2. Zinicovscaia I., Yushin N., Grozdov D., Rodlovskaya E., Khiem L.H. Yeast – as bioremediator of silver-con-

taining synthetic effluents // Bioengineering. 2023. Vol. 10, iss. 4. DOI: 10.3390/bioengineering10040398.

3. Sieber A., Jelic L.R., Kremser K., Guebitz G.M. Spent brewer's yeast as a selective biosorbent for metal recovery from polymetallic waste streams // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2024. Vol. 12. DOI: 10.3389/fbioe.2024.1345112.

4. Veglio F., Beolchini F. Removal of metals by biosorption: a review // Hydrometallurgy. 1997. Vol. 44, iss. 3. P. 301–316.
5. Diep P., Mahadevan R., Yakunin A.F. Heavy metal removal by bioaccumulation using genetically engineered microorganisms // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2018. Vol. 6. DOI: 10.3389/fbioe.2018.00157.
6. Лыков И.Н., Гаранин Р.А., Петрухина Д.И. Использование биомассы микроорганизмов для извлечения тяжелых металлов из сточных вод // Экология урбанизированных территорий. 2018. № 3. С. 60–63. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-13060.
7. Faraji M., Shirani M., Rashidi-Nodeh H. The recent advances in magnetic sorbents and their applications // Trends in Analytical Chemistry. 2021. Vol. 141. DOI:10.1016/j.trac.2021.116302.
8. Солопов М.В., Легенький Ю.А., Беспалова С.В., Холяк М.Г. Биосорбция ионов тяжелых металлов дрожжевыми клетками, модифицированными наночастицами магнетита // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2019. № 1. С. 96–102.
9. Diaz-Ravina M., Baath E. Development of metal tolerance in soil bacterial communities exposed to experimentally increased metal levels // Applied and Environmental Microbiology. 1996. Vol. 62, № 8. P. 2970–2977. DOI: 10.1128/aem.62.8.2970-2977.1996.
10. Гаранин Р.А., Лыков И.Н. Исследование возможности использования дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*) в качестве биосорбента тяжелых металлов из промышленных сточных вод // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. 2008. № 1 (28). С. 110–119.
11. Zablotskii V., Polyakova T., Dejneka A. Cells in the non-uniform magnetic world: how cells respond to high-gradient magnetic fields // BioEssays. 2018. Vol. 40, iss. 8. DOI: 10.1002/bies.201800017.
12. Bae J.-E., Huh M.-I., Ryu B.-K., Do J.-Y., Jin S.-U., Moon M.-J., Jung J.-C., Chang Y., Kim E., Chi S.-G., Lee G.-H., Chae K.-S. The effect of static magnetic fields on the aggregation and cytotoxicity of magnetic nanoparticles // Biomaterials. 2011. Vol. 32, iss. 35. P. 9401–9414. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2011.08.075.
13. Dobosz B., Gunia E., Kotarska K., Schroeder G., Kurczewska J. The effect of a magnetic field on the transport of functionalized magnetite nanoparticles into yeast cells // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, iss. 4. DOI: 10.3390/app14041343.
14. Турчин В.В., Лёгенький Ю.А., Солопов М.В., Попандопуло А.Г., Беспалова С.В., Фисталь Э.Я. Магнитофоретические свойства фетальных фибробластов человека, маркированных суперпарамагнитными наночастицами оксида железа, стабилизированными цитратом // Гены и клетки. 2017. Т. 12, № 1. С. 47–53.
15. Беспалова С.В., Кладько Д.В., Легенький Ю.А., Павлов В.Н., Глазунова В.А. Влияние низкочастотного переменного магнитного поля на жизнеспособность магнитомаркированных клеток *Saccharomyces cerevisiae* // Актуальные вопросы биологической физики и химии. 2019. Т. 4, № 3. С. 335–339.
16. Sigler K. Acidification power (AP) test and similar methods for assessment and prediction of fermentation activity of industrial microorganisms // Kvasny prum. 2013. Vol. 59, iss. 7–8. P. 204–208. DOI: 10.18832/kp2013021.

Работа выполнена в рамках государственного задания (регистрационный номер 124012400345-8).

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
Беспалова Светлана Владимировна, доктор физико-математических наук, профессор, ректор; Донецкий государственный университет (г. Донецк, Российская Федерация). E-mail: bespalova@donnu.ru. Легенький Юрий Анатольевич, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории магнитобиологии кафедры физиологии и биофизики; Донецкий государственный университет (г. Донецк, Российская Федерация). E-mail: yu-legen@mail.ru. Яицкий Андрей Степанович, старший преподаватель кафедры биологии, экологии и методики обучения; Самарский государственный социально-педагогический университет (г. Самара, Российская Федерация). E-mail: yaitsky@sgspu.ru.	Bespalova Svetlana Vladimirovna, doctor of physical and mathematical sciences, professor, rector; Donetsk State University (Donetsk, Russian Federation). E-mail: bespalova@donnu.ru. Legenkiy Yuri Anatolevich, senior researcher of Research Laboratory of Magnetobiology of Physiology and Biophysics Department; Donetsk State University (Donetsk, Russian Federation). E-mail: yu-legen@mail.ru. Yaitsky Andrey Stepanovich, senior lecturer of Biology, Ecology and Methods of Teaching Department; Samara State University of Social Sciences and Education (Samara, Russian Federation). E-mail: yaitsky@sgspu.ru.

Для цитирования:

Беспалова С.В., Легенький Ю.А., Яицкий А.С. Влияние постоянного магнитного поля на метаболизм и жизнеспособность магнитных биосорбентов на основе дрожжевых клеток // Самарский научный вестник. 2024. Т. 13, № 4. С. 14–19. DOI: 10.55355/snv2024134102.