

БИОСОРБЦИЯ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ДРОЖЖЕВЫМИ КЛЕТКАМИ, МОДИФИЦИРОВАННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ МАГНЕТИТА

М. В. Солопов¹, Ю. А. Легенький¹, С. В. Беспалова¹, М. Г. Холявка²

¹ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Поступила в редакцию 12.06.18 г.

Аннотация. Разработка инновационных биологических методов очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов является актуальным направлением исследований. За счет возможности сорбировать множество ионов металлов перспективным биологическим объектом для использования в роли очистителя воды являются клетки *Saccharomyces cerevisiae*, прикладной потенциал которых можно усилить путем маркирования магнитными наночастицами, что дает возможность управлять дрожжевой биомассой за счет воздействия магнитного поля. Статья посвящена оценке биосорбционных свойств парамагнитных клеток *Saccharomyces cerevisiae*, полученных путем маркирования наночастицами Fe_3O_4 , стабилизованными тетраметиламмонием гидроксидом (Fe_3O_4 -ТМАН) и цитратом натрия (Fe_3O_4 -Cit). Модификация клеток осуществлялась путем их кратковременной инкубации с наночастицами в глициновых буферных растворах с pH 2.2 и 10.6. Наночастицы добавляли в количестве 2 пг Fe / кл. Перед использованием в роли биосорбента дрожжевую биомассу обрабатывали 0.1 М раствором NaOH в течение 5 минут. Биосорбционные свойства нативных и модифицированных клеток определялись при очистке модельных растворов от ионов Cu^{2+} , Ni^{2+} и Fe^{3+} . Содержание ионов металлов регистрировали фотометрическими методами на протяжении 30 минут контактирования биосорбентов с растворами. На основе анализа кинетики извлечения ионов металлов из растворов определялись такие параметры как эффективность биосорбции и биосорбционная емкость клеток. Анализ конечных концентраций ионов металлов свидетельствует об очистке от них растворов на 85-100%. Кинетические зависимости биосорбционной емкости указывают на то, что максимальное значение этого параметра достигается уже после 5 минут контактирования биомассы *Saccharomyces cerevisiae* и раствора, содержащего ионы тяжелых металлов. Установлено, что модифицированные клетки могут более эффективно аккумулировать ионы меди и никеля по сравнению с нативными дрожжами, что может быть связано с участием наночастиц в процессе сорбции или их влиянии на поверхностные сайты дрожжевых клеток. Результаты исследования свидетельствуют о перспективности применения инструмента магнитной модификации клеток для облегчения сепарации дрожжей и улучшения их сорбционных свойств.

Ключевые слова: дрожжевые клетки, магнитные наночастицы, ионы тяжелых металлов, биосорбент

Одной из актуальных экологических проблем современного мира является загрязнение вод поллютантами различной природы, среди которых особую опасность представляют катионы тяжелых металлов [1]. Традиционные методы очистки сточных вод от этого типа загрязнителя имеют определенные недостатки, заключающиеся в эффективности удаления металлов и экономической целесообразности [2].

Многообещающие перспективы открывает потенциальная возможность использования в водо-

очистительных сооружениях широкодоступных биологических объектов, способных сорбировать загрязняющие вещества. Среди таких организмов отдельное место занимают дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*. Результаты исследований [3] указывают на то, что дрожжевые клетки могут сорбировать широкий спектр катионов тяжелых металлов (Zn^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} и др.).

Суперпарамагнитные наночастицы оксидов железа (SPION) интенсивно применяются в биомедицине и биотехнологиях для МРТ-визуализации, иммунологического анализа, гипертермии, тканевой инженерии, доставки лекарств и генов, а

© Солопов М. В., Легенький Ю. А., Беспалова С. В.,
Холявка М. Г., 2019

также клеточной и молекулярной сепарации [4]. Путем использования SPION в качестве маркеров дрожжевых клеток возможно создание нового типа биосорбента, которым можно манипулировать за счет приложения внешнего магнитного поля [5-10]. Использование таких модифицированных клеток для сорбции ионов тяжелых металлов открывает возможность для конструирования очистительных установок, в которых удаление биосорбента будет происходить за счет магнитной сепарации [11-13].

Цель данного исследования – оценка сорбционной емкости дрожжевых клеток, маркированных SPION, при аккумуляции некоторых ионов тяжелых металлов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для использования в экспериментах синтезировались два типа SPION: Fe_3O_4 -ТМАН и Fe_3O_4 -Cit, стабилизированные тетраметиламмонием гидроксидом и цитратом натрия соответственно. Синтез и стабилизацию магнитных наночастиц осуществляли по аналогии с методикой, описанной в работе [14]. Микрофотографии наночастиц получали с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM 200 (Япония). Определение качественного состава частиц проводили путем электронографии в режиме микродифракции электронного микроскопа.

Для магнитной модификации использовался коммерческий штамм сухих пекарских дрожжей *S. cerevisiae* («Саф-Левюр», Россия). Процедура получения биомассы дрожжевых клеток, маркированных наночастицами Fe_3O_4 , состояла из нескольких этапов. Изначально навеску сухих дрожжей суспендировали в 0.9% NaCl при 4 °C и центрифугировали в течение 7 минут при 1000 об/мин. Затем, если для маркировки применялись наночастицы Fe_3O_4 -ТМАН, биомасса суспендировалась в буфере глицин-NaOH (рН=10.6), при использовании Fe_3O_4 -Cit клетки суспендировались в буфере глицин-HCl (рН=2.2). После этого в суспензию добавляли колloid наночастиц с расчетом 2 пг Fe/кл и выдерживали в течение 1 минуты. Затем биомассу магнитомаркированных дрожжей троекратно отмывали 0.9% NaCl. В результате этой процедуры были получены два типа парамагнитных клеток: YFT- и YFC-клетки, покрытые наночастицами Fe_3O_4 -ТМАН и Fe_3O_4 -Cit соответственно.

Эффективность биосорбции и равновесную сорбционную емкость нативных, YFT- и YFC-

клеток определяли по кинетическим кривым сорбции катионов Cu^{2+} , Fe^{3+} и Ni^{2+} из модельных растворов в течение 30 минут. Для приготовления модельных растворов использовались следующие соли металлов: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (AppliChem GmbH, Германия). Начальные концентрации перечисленных катионов металлов в модельных растворах составляли: $[\text{Cu}^{2+}]_0 = 200$ мг/л, $[\text{Fe}^{3+}]_0 = 50$ мг/л, $[\text{Ni}^{2+}]_0 = 60$ мг/л.

Перед использованием нативных и магнитомаркированных дрожжевых клеток в качестве сорбента проводили трехкратную промывку биомассы дистиллированной водой путем центрифugирования при 1000 об/мин в течение 7 минут. Затем дрожжи выдерживали в 0.1 М растворе NaOH на протяжении 5 минут. После этого клеточную биомассу двукратно промывали. Затем пробирки с биосорбентом, суспендированном в модельном растворе металла, инкубировали на орбитальном шейкере (при 28 об/мин) на протяжении 30 минут. Концентрация биосорбента составляла 10 г/л. Остаточную концентрацию металла регистрировали после 1, 5, 10, 20 и 30 минут контактирования.

Изменение концентрации ионов Cu^{2+} после взаимодействия с биосорбентами регистрировали путем измерения оптической плотности комплекса $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$, который образуется в реакции: $\text{Cu}^{2+} + 4\text{NH}_3 = [\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ [15]. Для этого в мерную колбу на 50 мл вносили 8 мл исследуемой пробы, потом добавляли 10 мл 5% раствора аммиака (Merck, Германия). Раствор перемешивали и доводили до метки дистиллированной водой. Регистрацию оптической плотности окрашенного раствора проводили при 590 нм против холостого раствора.

Определение концентрации ионов Fe^{3+} осуществляли фотометрическим методом с сульфосалициловой кислотой [16]. В коническую колбу на 50 мл наливали 10 мл анализируемой пробы. Затем в колбу добавляли 5 мл 10% раствора сульфосалициловой кислоты (AppliChem GmbH, Германия) и 5 мл раствора аммиака (2:3). Оптическую плотность полученного раствора измеряли при 430 нм по отношению к холостому раствору.

Определение концентрации ионов Ni^{2+} проводили фотометрическим методом с диметилглиоксимом в присутствии йода [17]. Для этого в мерную колбу емкостью 50 мл вводили 2 мл 20 %-й винной кислоты (Shanghai Synnad, Китай), 10 мл концентрированного раствора аммиака и 1 мл 1% раствора ДМГ (Sigma-Aldrich, США). Затем прибавляли аликовенную часть подготовленного

раствора анализируемой пробы. В последнюю очередь добавляли 3 мл 0.01 н раствора I_2 (Merck, Германия) и доводили объем раствора до 50 мл дистиллированной водой. Оптическую плотность измеряли через 10 мин при 460 нм на фоне холостого раствора. Определение оптической плотности анализируемых растворов проводили с помощью спектрофотометра ULAB S 108UV (Китай). Концентрацию металлов на основе полученных значений оптической плотности определяли по калибровочным графикам.

Значение эффективности сорбции ионов металла биосорбентом рассчитывали по формуле:

$$E = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100. \quad (1)$$

где E – значение эффективности, %; C_i – начальная концентрация металла в растворе, мг/мл; C_f – конечная концентрация металла в растворе, мг/мл.

Сорбционную емкость биосорбента рассчитывали по формуле:

$$q = \frac{C_i - C_f}{m} \times V. \quad (2)$$

где q – сорбционная емкость, мг/г; C_i – начальная концентрация металла в растворе, мг/л; C_f – конечная концентрация металла в растворе, мг/л; m – масса биосорбента, г; V – объем реакционной смеси, л.

Статистическую обработку данных по кинетике биосорбции ионов металлов проводили путем регрессионного анализа. Экспериментальные данные моделировались уравнением кинетики адсорбции псевдо-второго порядка [18]:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{Kq_e^2} + \frac{1}{q_e} t. \quad (3)$$

где t – время, с; q_t – сорбционная емкость в заданный момент времени, мг/г; K – константа равновесной скорости, $\text{г}\cdot\text{мг}^{-1}\cdot\text{мин}^{-1}$; q_e – равновесная сорбционная емкость, мг/г.

Для определения коэффициентов кинетической модели использовался нелинейный регрессионный анализ, основанный на алгоритме Левенберга-Марквардта. Анализ был выполнен с помощью программы OriginPro 9.0 (США).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ электронных микрофотографий указывает на наноразмерность синтезированных SPION (рис. 1А). Электронограмма подтверждает кристаллическую структуру и качественный состав материала. На рис. 1Б представлены индексы Миллера, характеризующие расположение атомных плоскостей в кристалле Fe_3O_4 .

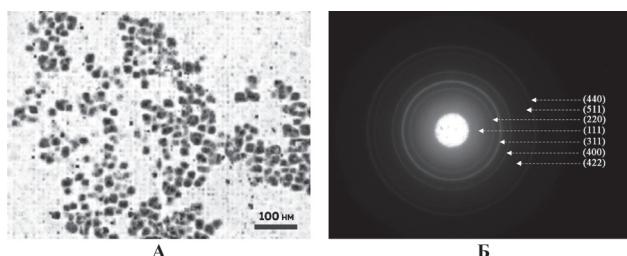


Рис. 1. Характеристика синтезированных наночастиц Fe_3O_4 : А - электронная микрофотография, Б - электронограмма наночастиц, полученная в режиме микродифракции микроскопа JEOL JEM 200 (указаны индексы Миллера, характерные для кристаллической структуры Fe_3O_4)

После завершения процедуры магнитомаркирования биомасса модифицированных клеток реагировала на приложение магнитного поля (рис. 2А). Стоит отметить, что степень агломерации у YFT- и YFC-клеток отличалась. Фракция YFT-клеток характеризовалась наличием большого количества клеточных агломератов (рис. 2Б). У нативных и YFC-клеток такой тенденции не наблюдалось (рис. 2Б и рис. 2Г). Причиной возникновения агломератов YFT-клеток может быть потеря стабильности наночастиц Fe_3O_4 -ТМАН во время процесса магнитомаркирования. Возможное объяснение такого явления кроется в том, что сильно поляризуемые катионы Na^+ , входящие в состав используемого глицинового буферного раствора, могут вызывать потерю стабильности наночастиц. В результате этого действия может происходить одновременно и агломерация SPION, и их адсорбция на клетки, что впоследствии вызывает образование агломератов модифицированных клеток. Агломерации наночастиц Fe_3O_4 -Cit при магнитомаркировании не происходило, так как они сохраняют свою стабильность в широком диапазоне значений pH [19].

Для повышения биосорбционного потенциала исследуемых клеток использовалась щелочная обработка. Результаты некоторых исследований утверждают, что обработка дрожжей щелочью увеличивает их способность к поглощению ионов металлов. Щелочь может разрушать автолитические ферменты, а также удаляет с поверхности дрожжевой клетки липиды и белки, которые маскируют сайты, участвующие в связывании катионов металлов [20].

Для исследования сорбционных свойств YFT- и YFC-клеток использовались растворы солей Cu^{2+} , Fe^{3+} и Ni^{2+} . В определенных количествах эти элементы должны поступать в организм, так как относятся к микроэлементам, входящим в состав некоторых белков и ферментов. Однако значительное превы-

шение концентраций этих элементов в воде может повлечь за собой нарушение ее органолептических и вкусовых свойств. Употребление воды с повышенным содержанием катионов этих металлов может вызывать образование свободных радикалов, различные заболевания и аллергические реакции.

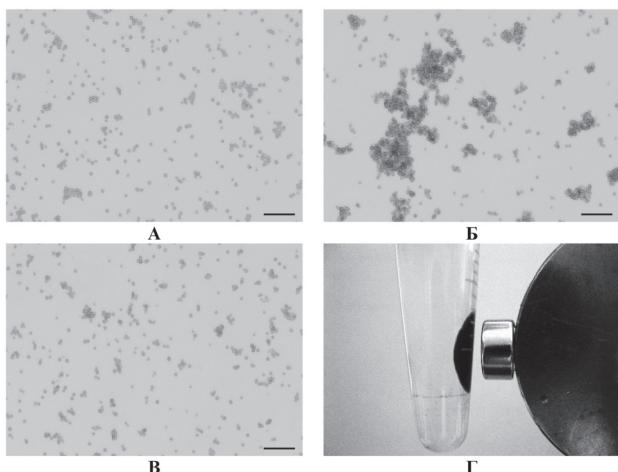


Рис. 2. Световая микроскопия нативных (А), YFT- (Б) и YFC-клеток (В) (масштабная линейка – 50 мкм); Г – реакция биомассы магнитомаркированных дрожжей на приложение магнита

Результаты кинетических исследований, позволивших определить эффективность биосорбции ионов металлов, сорбционную емкость нативных и магнитомодифицированных клеток, а также оптимальное время для протекания процесса биосорбции представлены на рис. 3А-3Е. Характер полученных зависимостей свидетельству-

ет о том, что процесс биосорбции ионов металла всеми типами исследуемых дрожжей происходит с высокой эффективностью. В табл. 1 приведены значения эффективности удаления ионов металлов после 30 минут взаимодействия с представленными биосорбентами. Полученные значения свидетельствуют о том, что по описанной методике подготовки и использования дрожжевых биосорбентов удается очистить модельные растворы от ионов тяжелых металлов на 85-100%. Однако такая относительно высокая степень извлечения ионов металлов не позволила вполне достичь требуемых норм по предельно допустимым концентрациям (ПДК) этих веществ в воде. В соответствии с Санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами РФ (СанПиН 2.1.4.1116-02) содержание меди в воде не должно составлять более 1 мг/л, никеля – 0.02 мг/л, а железа – 0.3 мг/л. Таким образом, только в случае биосорбции ионов железа YFC-клетками удалось достичь той степени очистки, которая соответствует санитарным требованиям.

Кинетические исследования показали, что достижение состояния равновесия при биосорбции всех исследуемых катионов достигается довольно быстро, уже после 1-5 минут контактирования. Стоит отметить, что на протяжении 30 минут десорбции ионов металлов не наблюдалось, что говорит о возникновении прочных связей с функциональными группами поверхностного аппарата клеток.

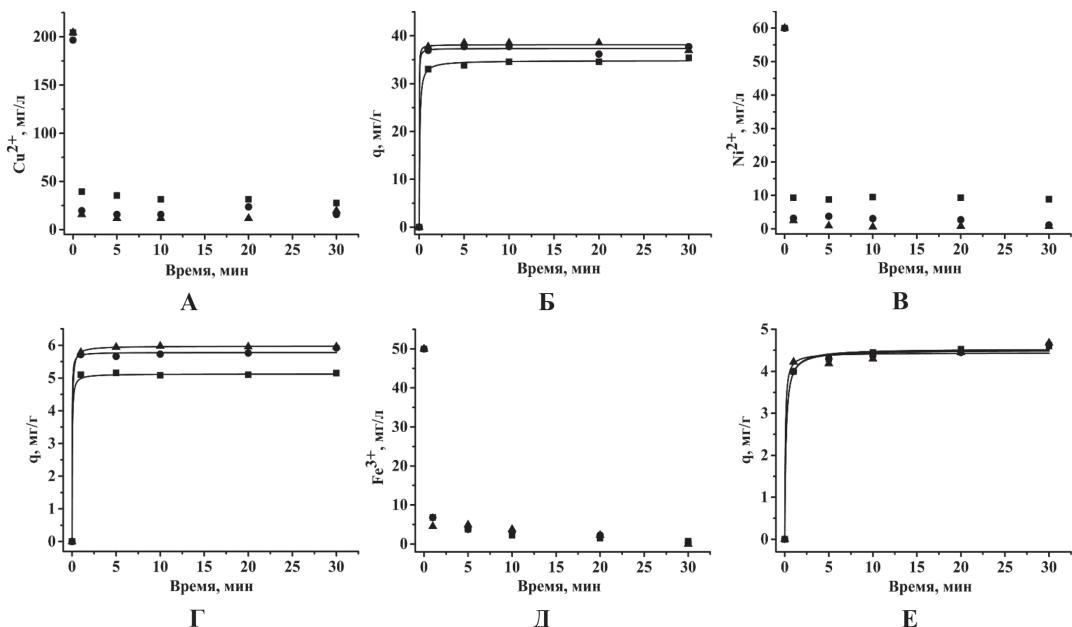


Рис. 3. Изменение во времени концентрации ионов металлов и биосорбционной емкости в модельных растворах ионов Cu²⁺ (А-Б), Ni²⁺ (В-Г) и Fe³⁺ (Д-Е) при контакте с: ■ – нативными клетками, ● – YFT-клетками, ▲ – YFC-клетками (кривые представлены по результатам регрессионного анализа)

Таблица 1.

Эффективность сорбции тяжелых металлов дрожжевыми клетками

Тип клеток	Cu ²⁺			Ni ²⁺			Fe ³⁺		
	C _e , мг/л	C _p , мг/л	E, %	C _e , мг/л	C _p , мг/л	E, %	C _e , мг/л	C _p , мг/л	E, %
Нативные	200	27.52	86.24	60	8.86	85.23	50	0.75	98.50
		15.72	92.14		1.14	98.10		0.38	99.24
		19.65	90.18		0.80	98.67		-	100

Таблица 2.

Параметры кинетики биосорбции ионов металлов исследуемыми типами клеток

Тип клеток	Cu ²⁺			Ni ²⁺			Fe ³⁺		
	q _e , мг/г	K, г·мг ⁻¹ ·мин ⁻¹	R ²	q _e , мг/г	K, г·мг ⁻¹ ·мин ⁻¹	R ²	q _e , мг/г	K, г·мг ⁻¹ ·мин ⁻¹	R ²
Нативные	34.81	0.49	0.999	5.12	7.00	0.999	4.53	1.56	0.998
YFT-клетки	37.35	3.15	0.998	5.78	11.33	0.998	4.50	1.67	0.997
YFC-клетки	38.13	3.60	0.998	5.98	5.13	0.999	4.44	3.57	0.991

Результаты регрессионного анализа кинетических зависимостей биосорбционной емкости исследуемых биосорбентов представлены в табл. 2. Экспериментальные данные хорошо описываются выбранной кинетической моделью, что отражено высокими значениями коэффициента детерминации R². Отдельного внимания заслуживает тот факт, что биосорбция ионов Cu²⁺ и Ni²⁺ магнитомаркированными YFT- и YFC-клетками проходит с большей интенсивностью по сравнению с нативными клетками. Это отражено в значениях равновесной биосорбционной емкости (q_e). При сорбции Cu²⁺ значение q_e для нативных клеток составляет 34.81 мг/г, а YFT- и YFC-клеток – 37.35 мг/г и 38.13 мг/г соответственно. При сорбции Ni²⁺ значение q_e для нативных клеток составляет 5.12 мг/г, а YFT- и YFC-клеток – 5.78 мг/г и 5.98 мг/г соответственно. При биосорбции ионов Fe³⁺ значимых различий между значениями q_e, характерными для нативных и магнитомаркированных клеток, не наблюдалось.

Возможной причиной усиления биосорбционной емкости модифицированных клеток может быть участие наночастиц в процессе связывания ионов металлов или их влияние на состав и свойства поверхностных сайтов дрожжевой клетки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модификация дрожжевых клеток с помощью магнитных наночастиц является инструментом, который может усилить прикладную значимость этого биообъекта. В представленной работе были исследованы сорбционные свойства двух типов дрожжевых клеток, маркированных наночастицами магнетита. Обнаружено, что после 30-минутного контактирования модифицированных биосорбентов с растворами катионов Cu²⁺, Ni²⁺ и Fe³⁺ удается добиться очистки на 85-100%. Биосорбен-

ты на основе YFT- и YFC-клеток обладают усиленной сорбционной емкостью при аккумуляции ионов меди и никеля по сравнению с нативными клетками. Полученные результаты указывают на перспективность использования дрожжевых клеток, маркированных наночастицами магнетита, в качестве управляемых биосорбентов ионов тяжелых металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N. // Interdiscip. Toxicol. 2014. Vol. 7. No. 2. pp. 60-72.
- Гаранин Р.А. Дисс. канд. биол. наук. Москва, 2011, 168 с.
- Wang J., Chen C. // Biotechnol. Adv. 2006. № 24. pp. 427-451.
- Laurent S., Forge D., Port M., Roch A., Robic C., Vander E.L., Muller R.N. // Chem. Rev. 2008. № 108. pp. 2064-2110.
- Safarikova M., Maderova Z., Safarik I. // Food Res. Int. 2009. №42. pp. 521-524.
- Safarik I., Maderova Z., Pospiskova K., Baldikova E., Horska K., Safarikova M. // Yeast. 2015. № 32. pp. 227-237.
- Xu M., Zhang Y., Zhang Z., Shen Y., Zhao M., Pan G. // Chem. Eng. J. 2011. № 168. pp. 737-745.
- Gorobets S.V., Gorobets O.Yu., Demianenko I.V., Nikolaenko R.N. // J. Magn. Magn. Mater. 2013. № 337-338. pp. 53-57.
- Uzun L., Saglam N., Safarikova M., Safarik M., Denizli A. // Sep. Sci. Technol. 2011. № 46. pp. 1045-1051.
- Yavuz H., Denizli A., Gungunes H., Safarikova M., Safarik I. // Sep. Purif. Technol. 2006. № 52. pp. 253-260.
- Yavuz C.T., Prakash A., Mayo J.T., Colvin V.L. // Chem. Eng. Sci. 2009. № 64. pp. 2510-2521.

12. Ambashta R.D., Sillanpaa M. // J. Hazard. Mater. 2010. № 180. pp. 38-49.
13. Berovic M., Darko M., Matjaz B., Slavko K. // Biochem. Eng. J. 2014. №88. pp. 77-84.
14. Massart R. // Trans. Magn. 1981. Vol. 17. pp. 1247-1249.
15. Горобець С.В., Горобець О.Ю., Лізунов В.В. Біосорбція іонів металів з технологічних розчинів. Київ, НТУУ «КПІ», 2009, 97 с.
16. Лурье Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. Москва, Химия, 1984, 448 с.
17. Дударева Г.Н., Нгуен Нгок А.Т. // Вестник ИрГТУ. 2010. №4 (44). С. 84-87.
18. Farhan S.N., Khadom A.A. // Int. J. Ind. Chem. 2015. № 6. pp. 119-130.
19. Nigam S., Barick K.C., Bahadur D. // J. Magn. Magn. Mater. 2011. № 323. pp. 237-243.
20. Atkinson B.W., Bux F., Kasan H.C. // Water Sci. Technol. 1996. № 34. pp. 9-15.

Донецкий национальный университет

*Соловьев М. В., научный сотрудник отдела «Физика магнитных явлений и высокотемпературная сверхпроводимость»

E-mail: mxsolopov@yandex.ru

Легенкий Ю. А., старший научный сотрудник отдела «Физика магнитных явлений и высокотемпературная сверхпроводимость»

E-mail: yu-legen@mail.ru

Беспалова С. В., д.ф.-м.н., профессор кафедры биофизики

E-mail: bespalova.svetlana@gmail.com

Воронежский государственный университет
Холявка М. Г., д.б.н., доцент кафедры биофизики и биотехнологии

e-mail: hollyavka@rambler.ru

Donetsk National University

*Solopov M. V., researcher, department of Physics of Magnetic Phenomena and High Temperature Superconductivity

E-mail: mxsolopov@yandex.ru

Legenkiy Y. A., senior researcher, department of Physics of Magnetic Phenomena and High Temperature Superconductivity

E-mail: yu-legen@mail.ru

Bespalova S. V., PhD., DSci., department of biophysics,

E-mail: bespalova.svetlana@gmail.com

Voronezh State University

Hollyavka M. G., Ph.D, DSci., Associate Professor, department of biophysics and biotechnology,

E-mail: hollyavka@rambler.ru

BIOSORPTION OF HEAVY METALS IONS BY YEAST CELLS MODIFIED WITH MAGNETITE NANOPARTICLES

M. V. Solopov¹, Yu. A. Legenkiy¹, S. V. Bespalova¹, M. G. Hollyavka²

¹Donetsk National University

²Voronezh State University

Abstract. Development of innovative biological methods for wastewater purification from heavy metal ions has a great scientific interest. Due to their ability to sorb effectively many kinds of metal ions yeasts *Saccharomyces cerevisiae* are promising biological object for use as a water purifier. The applied potential of this yeasts can be strengthened by marking with magnetic nanoparticles, which makes it possible to control yeast biomass due to the action of the magnetic field. This article is devoted to the evaluation of biosorption properties of paramagnetic cells of *Saccharomyces cerevisiae* obtained by marking with Fe_3O_4 nanoparticles stabilized by tetramethylammonium hydroxide (Fe_3O_4 -TMAH) and sodium citrate (Fe_3O_4 -Cit). Modification of cells was carried out by short-time incubation of cells with nanoparticles in glycine buffer solutions with pH 2.2 and 10.6. The amount of nanoparticles was 2 pg Fe per cell. Immediately before biosorption the yeasts biomass was treated with 0.1 M NaOH solution for 5 minutes. The biosorption properties of intact and modified cells were determined during purification of model solutions from Cu^{2+} , Ni^{2+} and Fe^{3+} ions. Concentration of metal ions was measured by photometric methods after application of the biosorbent to the model solution for 30 minutes. Basing on the analysis of the kinetics of metal ions reduction from model solutions, parameters such as the efficiency of biosorption and the biosorption capacity

of cells were determined. According to the analysis of final concentrations of metal ions the purification rate of the model solutions was in the range of 85-100%. Kinetic dependencies of the biosorption capacity indicated that the maximum value of this parameter reached after 5 minutes of the biosorbent application. It was found that modified cells can more effectively accumulate copper and nickel ions compared to intact yeast, which may be due to the participation of nanoparticles in the process of sorption or their effect on the surface sites of the yeast cells. The results of the study indicate the promise of using magnetic modification of cells to facilitate the separation of yeast and improve their sorption properties.

Keywords: yeast cells, magnetic nanoparticles, heavy metal ions, biosorbent.

REFERENCES

1. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N., *Interdiscip Toxicol.*, 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 60-72. DOI: 10.2478/intox-2014-0009.
2. Garanin R.A. *Diss. cand. biol. nauk. Moscow*, 2011, 168 p.
3. Wang J., Chen C., *Biotechnol. Adv.*, 2006, No. 24, pp. 427-451. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2006.03.001.
4. Laurent S., Forge D., Port M., Roch A., Robic C., Vander E.L., Muller R.N., *Chem. Rev.*, 2008, No. 108, pp. 2064-2110. DOI: 10.1021/cr068445e.
5. Safarikova M., Maderova Z., Safarik I., *Food Res. Int.*, 2009, No. 42, pp. 521-524. DOI: 10.1016/j.foodres.2009.01.001.
6. Safarik I., Maderova Z., Pospiskova K., Baldikova E., Horska K., Safarikova M., *Yeast*, 2015, No. 32, pp. 227-237. DOI: 10.1002/yea.3043.
7. Xu M., Zhang Y., Zhang Z., Shen Y., Zhao M., Pan G., *Chem. Eng. J.*, 2011, No. 168, pp. 737-745. DOI: 10.1016/j.cej.2011.01.069.
8. Gorobets S.V., Gorobets O.Yu., Demianenko I.V., Nikolaenko R.N., *J. Magn. Magn. Mater.*, 2013, No. 337-338, pp. 53-57. DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.01.004.
9. Uzun L., Saglam N., Safarikova M., Safarik M., Denizli A., *Sep. Sci. Technol.*, 2011, No. 46, pp. 1045-1051. DOI: 10.1080/01496395.2010.541400.
10. Yavuz H., Denizli A., Gungunes H., Safarikova M., Safarik I., *Sep. Purif. Technol.*, 2006, No. 52, pp. 253-260. DOI: 10.1016/j.seppur.2006.05.001.
11. Yavuz C.T., Prakash A., Mayo J.T., Colvin V.L., *Chem. Eng. Sci.*, 2009, № 64, pp. 2510-2521. DOI: 10.1016/j.ces.2008.11.018.
12. Ambashta R.D., Sillanpaa M., *J. Hazard. Mater.*, 2010, № 180, pp. 38-49. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.04.105.
13. Berovic M., Darko M., Matjaz B., Slavko K., *Biochem. Eng. J.*, 2014, No. 88, pp. 77-84. DOI: 10.1016/j.bej.2014.03.014.
14. Massart R., *Trans. Magn.*, 1981, Vol. 17, pp. 1247-1249. DOI: 10.1109/TMAG.1981.1061188.
15. Gorobets S.V., Gorobets O.Ju., Lizunov V.V. *Biosorbcija ioniv metaliv z tehnologichnyh rozchyniv*. Kyiv, NTUU «KPI» Publ., 2009, 97 p.
16. Lure Yu.Yu. *Analiticheskaya khimiya promyshlennyykh stochnykh vod*. Moscow, Khimiya Publ., 1984, 448 p.
17. Dudareva G.N., Nguen Ngok A.T., *Vestnik IrGTU*, 2010, No. 4 (44), pp. 84-87.
18. Farhan S.N., Khadom A.A., *Int. J. Ind. Chem.*, 2015, No. 6, pp. 119-130. DOI: 10.1007/s40090-015-0038-8.
19. Nigam S., Barick K.C., Bahadur D., *J. Magn. Magn. Mater.*, 2011. No. 323, pp. 237-243. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.09.009.
20. Atkinson B.W., Bux F., Kasan H.C., *Water Sci. Technol.*, 1996, No. 34, pp. 9-15. DOI: 10.1016/S0273-1223(96)00781-0.