

БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ТРУДНОРАСТВОРИМЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕОДИМА МИКРОСКОПИЧЕСКИМИ ГРИБАМИ КОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ

BIOLEACHING OF POORLY SOLUBLE NEODYMIUM COMPOUNDS BY MICROSCOPIC FUNGI BY CONTACT METHOD

Н. А. Сороколетова^{1,2}, Е. И. Серебров^{1,2}, С. Н. Беляев², Д. В. Белов²

¹Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

²Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грекова РАН, Нижний Новгород

N. A. Sorokolетова^{1,2}, E. I. Serebrov^{1,2}, S. N. Belyaev², D. V. Belov²

¹Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

²A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod

✉ n.sorokolетова@ipfran.ru

Аннотация

В работе показана возможность эффективного извлечения неодима из его оксида в растворимую форму выщелачиванием посредством прямого контакта с микромицетами. Результаты работы помогут раскрыть потенциал микромицетов для применения в экологически чистой технологии извлечения редкоземельных элементов. Это может послужить основанием для разработки экологичной альтернативы применяемым методам, использующим неорганические кислоты и токсичные вещества.

Abstract

The study demonstrates the possibility of efficient extraction of neodymium from its oxide into a soluble form by leaching through direct contact with micromycetes. The results of the paper will help to reveal the potential of micromycetes for use in environmentally friendly technology for extracting rare earth elements. This may serve as a basis for developing an environmentally friendly alternative to the methods used using inorganic acids and toxic substances.

Редкоземельные элементы (РЗЭ) широко используются во всех современных отраслях промышленности, включая оборонную. Они являются ценным стратегическим ресурсом. Хотя РЗЭ присутствуют в земной коре в достаточном количестве, доля их извлечения гораздо меньше по сравнению с другими металлами. В то же время отходы электронной промышленности, содержащие значительное количество редкоземельных металлов, являются одними из самых быстрорастущих.

В отличие от гидрометаллургического пути извлечения РЗЭ из их труднорасторимых соединений, технология биовыщелачивания является более щадящей для окружающей среды. Широко известно бактериальное биовыщелачивание, по сравнению с ним биовыщелачивание микромицетами имеет ряд преимуществ: микромицеты способны расти в широком диапазоне значений pH, приспособлены к условиям с повышенным содержанием ионов тяжелых металлов, токсичных соединений, для их жизнедеятельности достаточно недорогих органических субстратов.

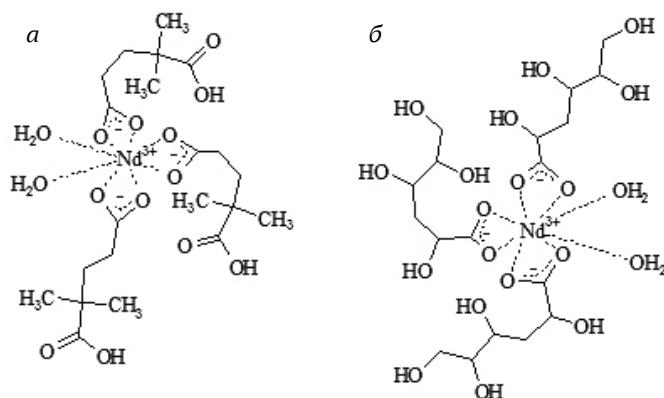
В данной работе изучали биовыщелачивание неодима из его оксида Nd_2O_3 методом прямого контакта микроскопическими грибами *Aspergillus niger*. Их способность к извлечению катионов металлов связана с продуцированием органических кислот в результате жизнедеятельности. Для проведения экспериментов по биовыщелачиванию на дно стерильных чашек Петри помещали навеску оксида неодима Nd_2O_3 и заливали стерильную и охлажденную до 50 °C среду Чапека – Докса. Концентрация Nd_2O_3 составляла 100 мг/л. Стерильную питательную среду с порошком Nd_2O_3 тщательно перемешивали для равномерного распределения частиц по объему. Чашки с застывшей питательной средой термостатировали 3 сут, после чего инокулировали культурой *A. niger*. Инкубацию проводили при температуре 27 ± 2 °C в течение 6 мес до полного истощения питательной среды. Сравнение проводили с контрольными чашками, которые оставались стерильными и инкубировались также в течение 6 мес, в которых частицы оксида неодима на плотной питательной среде оставались без изменений [1].

Для подтверждения гипотезы о накоплении РЗЭ клетками микромицета навеску 2 г сухого остатка биомассы микромицета *A. niger* без питательной среды после процесса биовыщелачивания озолили в высокотемпера-

турной печи (550 °C, 3 ч), затем к золе прилили 5 мл азотной кислоты (63 %) и упарили раствор до объема пробы 1 мл. Полученную пробу растворили в бидистиллированной воде и проанализировали спектрометрическим методом на наличие неодима. Результаты показали, что содержание Nd³⁺ в мицелии *A. niger* составило 40 % от начальной концентрации Nd₂O₃ в питательной среде.

Для изучения подтверждения нахождения ионов Nd³⁺ в растворенном виде в питательной среде и исследования выщелачивающих метаболитов микромицета провели экстракцию. Высохшую питательную среду с остатками культуры микромицетов (мицелий и споры) измельчили и непрерывно экстрагировали в аппарате Сокслета в течение 1 ч. Экстрагентами послужили этиловый (96 масс.%) и изопропиловый спирты. Для отделения остатков клеток и спор микромицетов полученные экстракты светло-желтого цвета были дважды профильтрованы через мембранный фильтр для микрофильтрации.

С помощью рентгенофлуоресцентного анализа установили наличие ионов Nd³⁺ в экстракте питательной среды. Предполагается, что ионы РЗЭ диффундируют в среду в виде соединений с органическими кислотами и хелаторами, продуцируемыми микромицетом в процессе жизнедеятельности. Для исследования выщелачивающих метаболитов было проведено исследование экстракта мицелия на хромато-масс-спектрометре. По результатам исследований был идентифицирован ряд агентов, способных к реакции с оксидом неодима в питательной среде и хелатированию ионов Nd³⁺: 2,2-диметилглутаровая кислота, фенилмалоновая кислота, 2-дезокси-D-эритропентоза, пальмитиновая кислота, олеиновая кислота, стеариновая кислота. На рисунке приведены предполагаемые структуры комплексных соединений неодима с 3-дезокси-D-маннновой (а) и 2,2-диметилглутаровой (б) кислотами



Предполагаемые структуры комплексных соединений неодима с 3-дезокси-D-маннновой (а) и 2,2-диметилглутаровой (б) кислотами

Литература

1. Belov D. V., Belyaev S. N., Razov E. N. et. al. Green strategy for bioleaching of poorly soluble neodymium compounds by microscopic fungi // Applied Biochemistry and Microbiology. 2025. Vol. 61 (4). P. 762-777.