

А. Б. Таширев, Н. А. Матвеева, А. А. Таширева,
В. А. Романовская

**Экспериментальное обоснование термодинамического
прогнозирования редокс-взаимодействия
микроорганизмов с металлами-окислителями
(Hg^{2+} , CrO_4^{2-} и Cu^{2+})**

(Представлено академиком НАН Украины П. Ф. Гожижком)

The growth of chemoorganotrophic microorganisms at ultrahigh concentrations of toxic metals-oxidizers (Hg^{2+} , CrO_4^{2-} , and Cu^{2+}) is possible owing to a manifold increase in the concentration of metals (from $1 \cdot 10^{-8}$ up to 1.0 mole/l) causes increasing their standard redox-potential (E_o) only by 200...400 mV, which stays in a zone of thermodynamic stability of water ($-414 \text{ mV} \leq E_h \leq +814 \text{ mV}$). Microorganisms of the granulated biocatalyst and Antarctic soil microorganisms are capable to grow in the presence of 500...1000 ppm Hg (II), 5000...60000 ppm Cr(VI), and 1000...10000 ppm Cu(II). High values of redox-potentials of Hg^{2+} , CrO_4^{2-} , and Cu^{2+} (+920 mV, +555 mV and +440 mV) predetermine the reduction of these metals by alive microorganisms. Microbial reduction of Hg^{2+} , CrO_4^{2-} , and Cu^{2+} leads to the formation of insoluble forms of metals and their sedimentation in solutions. Technogenic associations and the Antarctic soil microorganisms resistant to ultrahigh concentrations of these metals can be used for the development of new environment-protective technologies providing the purification of industrial waste waters from metals in any certain concentration or a wide range of concentrations.

В 1994 г. нами опубликована концепция термодинамического прогнозирования взаимодействия микроорганизмов с металлами [1], согласно которой существует принципиальная возможность восстановления любого металла микроорганизмами. В дальнейшем нами были выполнены термодинамические расчеты, обосновывающие принципиальную возможность роста микроорганизмов при сверхвысоких концентрациях токсичных металлов-окислителей, таких как Hg^{2+} , CrO_4^{2-} и Cu^{2+} . Показано, что при многократном повышении концентрации металлов (от $1 \cdot 10^{-8}$ до 1,0 моль/л) их стандартный редокс-потенциал (E_o) увеличивается лишь на 200–400 мВ и не выходит за пределы термодинамической устойчивости воды. Отсюда следует, что микроорганизмы могут расти в присутствии $\text{Hg}(\text{II})$, $\text{Cr}(\text{VI})$ и $\text{Cu}(\text{II})$ при их концентрации, составляющей десятки граммов в литре, и, кроме того, восстанавливать эти металлы [2].

В настоящем сообщении приведены экспериментальные данные, подтверждающие теоретические положения о возможности роста микроорганизмов при сверхвысоких концентрациях Hg^{2+} , CrO_4^{2-} и Cu^{2+} .

В работе использовали техногенные синтрофные ассоциации, а также антарктические микроорганизмы из Украинской коллекции микроорганизмов (УКМ). Техногенные ассоциации представлены смесью микроорганизмов активного ила аэротенка и сброженного осадка метантенка Бортнической станции аэрации (Киев). Из биомассы указанных техногенных ассоциаций готовили гранулированный микробный препарат, названный “микробным биокатализатором” (МБК). МБК, кроме микроорганизмов, содержал также все необходимые

для них источники питания [3]. Гранулы МБК вносили в раствор с металлами в массовом соотношении 1 : 40...1 : 50. Антарктические микроорганизмы были выделены ранее из почв Западной Антарктики (Аргентинский архипелаг, о. Галиндез, Украинская антарктическая станция “Академик Вернадский”) [4]. Для культивирования микроорганизмов использовали такие среды, как мясопептонный бульон (МПБ) и мясопептонный агар (МПА). В ряде экспериментов в среды вносили глюкозу (20 г/л) в качестве дополнительного источника углерода и энергии.

Металлы вносили в среды в концентрационном диапазоне, мг металл-иона/л: 100–3000 Cu^{2+} , 100–1000 Hg^{2+} , 1000–60 000 Cr(VI) . Соединения Cr(VI) вносили в среду в виде K_2CrO_4 (в пересчете на концентрацию катиона Cr^{6+}). Нитрат ртути получали растворением металлической ртути (1,0 г) в концентрированной HNO_3 (5,0 мл). Раствор упаривали на водяной бане, а затем полученный $\text{Hg(NO}_3)_2$ растворяли в дистиллированной воде (1 л). Раствор содержал 1000 мг/л Hg^{2+} ($Eh = +920$ мВ, pH 2,0). Соединения хрома(VI) и меди(II) получали растворением K_2CrO_4 и $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ в дистиллированной воде. В раствор с Cu^{2+} в качестве хелатирующего соединения добавляли двузамещенный цитрат натрия в эквимолярном соотношении к металлам и доводили pH раствора сухим NaHCO_3 до 7,0. Растворы металлов стерилизовали кипячением (30 мин) на водяной бане.

Концентрацию металлов определяли методом атомно-адсорбционной спектроскопии (Hg) [5] и колориметрическим методом (Cu^{2+} , Cu(I) и CrO_4^{2-}). Концентрацию Cu^{2+} определяли с помощью ПАР (4-(2-пиридилазо)-резорцина), Cu(I) — с батокупроином (2,9-диметил-4,7-дифенил-1,10-фенантролином), CrO_4^{2-} — с дифенилкарбазидом [6]. Нерастворимые (осажденные) соединения меди (CuCO_3 , Cu(OH)_2 и др.) переводили в раствор с помощью 0,1 N HCl , а затем определяли их концентрацию с помощью ПАР.

Редокс-потенциал (Eh) и pH измеряли потенциометрическим методом на pH-метре-милливольтметре “pH-121” с помощью измерительных электродов и хлорсеребряного электрода сравнения ЭВЛ-1МЗ. Для измерения pH использовали электрод ЭСЛ-63-07, а для редокс-потенциала — платиновый электрод ЭПВ-1. Непрерывное измерение редокс-потенциала и pH в растущих культурах микроорганизмов проводили в сконструированной нами измерительной ячейке [7].

Для проверки нашего термодинамического прогноза о возможности существования микроорганизмов при сверхвысоких концентрациях металлов-окислителей [2] антарктические микроорганизмы, а также техногенные микробные ассоциации культивировали при сверхвысоких концентрациях Hg^{2+} , CrO_4^{2-} и Cu^{2+} (1000–60000 мг-ион металла/л).

На рис. 1 приведены данные по метаболической активности техногенных микробных ассоциаций (гранулированный препарат МБК) в отсутствие (контрольный вариант) и в присутствии тяжелых металлов. Метаболическая активность микроорганизмов МБК условно разделена на три фазы: А — адаптивного метаболизма, В — активного метаболизма и С — замедленного метаболизма. Эти фазы по своему биологическому значению аналогичны фазам роста монокультур: лаг-фазе, логарифмической фазе роста и стационарной фазе роста [8].

При изучении взаимодействия микроорганизмов с Hg^{2+} гранулы МБК вносили в водный раствор, содержащий 1000 мг/л Hg^{2+} в виде $\text{Hg(NO}_3)_2$. В такой высокой концентрации нитрат ртути создает в растворе кислую реакцию среды, и величина pH составляет 2,0 (см. рис. 1, б). Поэтому и в контрольном варианте (см. рис. 1, а) pH среды доводили до 2,0 разбавленной HNO_3 .

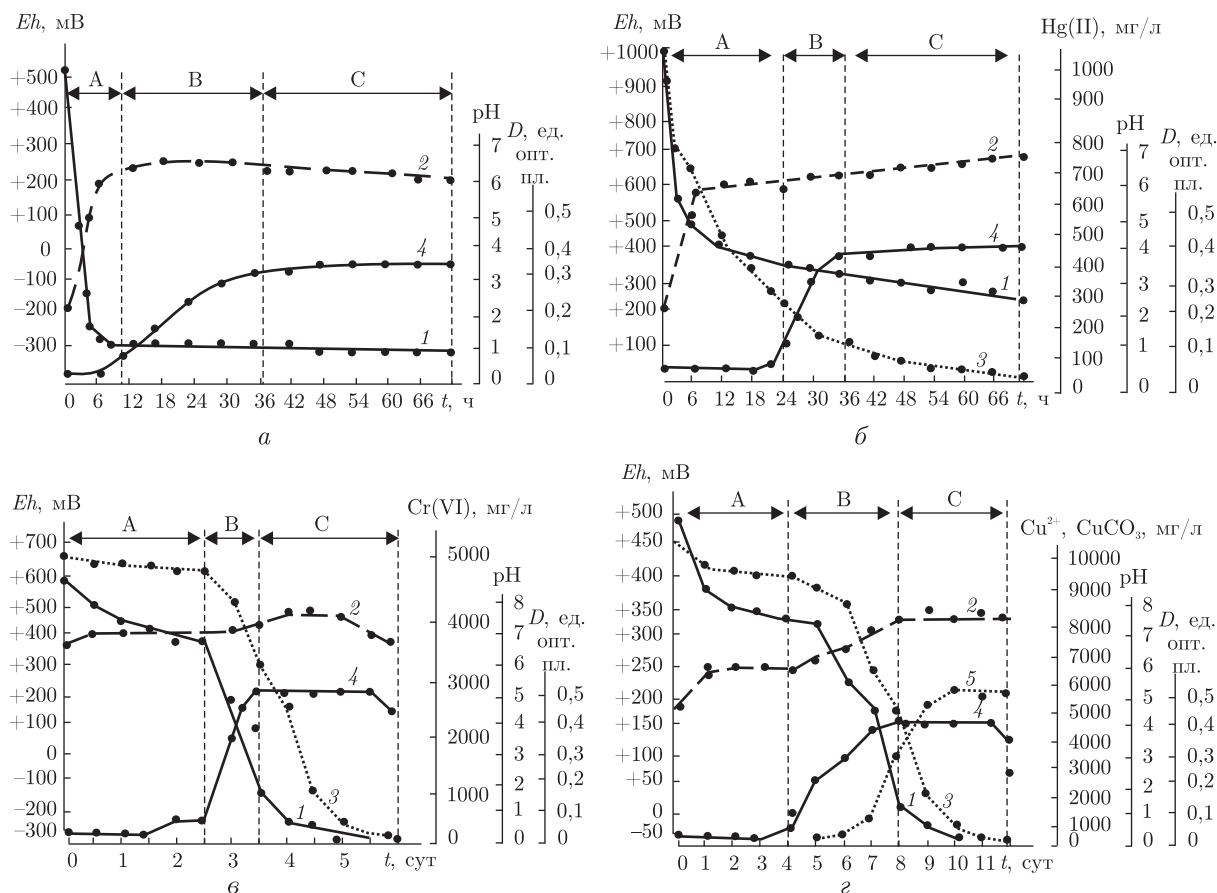


Рис. 1. Показатели метаболической активности техногенной ассоциации микроорганизмов (МБК) в отсутствие тяжелых металлов (а), при наличии 1000 мг/л Hg^{2+} (б), 5000 мг/л Cr(VI) (в), 10000 мг/л Cu^{2+} (г). 1 — редокс-потенциал (Eh , мВ); 2 — рН; 3 — концентрация в растворе металла (мг/л); 4 — оптическая плотность (прирост биомассы микроорганизмов); 5 — концентрация CuCO_3 в осадке. А, В, С — фазы метаболической активности микроорганизмов (см. текст). Массовое соотношение гранулы МБК: раствор составляло 1 : 40

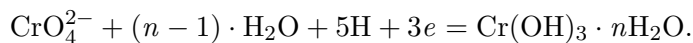
В контрольном варианте (без металлов) микроорганизмы МБК осуществили быструю корректировку Eh и рН, которая проявлялась в снижении Eh и повышении рН (см. рис. 1, а). В фазе А (продолжительность 1–12 ч) значение рН увеличилось от 2,0 до 6,0, а Eh снизилось от +520 до –310 мВ. В фазе В микроорганизмы начали размножаться, вследствие чего оптическая плотность (D) увеличилась от 0 до 0,3. В фазе С показатели метаболической активности (рН, Eh и D) практически не изменялись.

Соединения ртути(II) являются сильными окислителями. В результате, при 1000 мг/л Hg^{2+} значение Eh составляло +920 мВ (рН 2,0) и было на 400 мВ выше, чем в контроле (+520 мВ) (см. рис. 1, б). Ранее мы теоретически обосновали, что микробный метаболизм может осуществляться лишь в зоне термодинамической устойчивости воды ($-414 \text{ мВ} \leq Eh \leq +814 \text{ мВ}$) [2]. Из представленных экспериментальных данных (см. рис. 1, б) следует, что при 1000 мг/л Hg^{2+} редокс-потенциал раствора на 106 мВ превышал предельно допустимое значение (+814 мВ). Согласно термодинамическому прогнозу микроорганизмы не могут расти при столь высоком значении редокс-потенциала. Именно поэтому в фазе А микроорганизмы техногенной ассоциации одновременно снижали редокс-потенциал (от

+920 до +360 мВ), уменьшали концентрацию Hg^{2+} в растворе (от 1000 до 280 мг/л) и повышали pH (от 2,0 до 6,0). И лишь затем (после корректировки Eh и pH) микроорганизмы начинали расти (фазы В и С), о чем свидетельствует увеличение оптической плотности культуральной жидкости. В соответствии с термодинамическим прогнозом, микроорганизмы не только росли в присутствии высокой концентрации ртути, но и взаимодействовали с ней. Так, за 3 сут (72 ч) концентрация Hg^{2+} в растворе уменьшилась от 1000 до 1 мг/л. Катион Hg^{2+} по отношению к микроорганизмам одновременно проявляет свойства как металла-окислителя ($E'_o = +920$ мВ), так и двувалентного металла-заместителя. Поэтому мы предположили, что удаление Hg(II) из раствора микроорганизмы осуществляют как за счет восстановления катиона Hg^{2+} до нерастворимой Hg^0 , так и за счет замещения катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в клеточной стенке. Кроме того, можно предположить, что микроорганизмы также осаждают Hg^{2+} экзометаболитами в виде нерастворимых соединений, например “металл-белок”, HgS и HgCO_3 .

Для металлрезистентных микроорганизмов, выделенных из антарктических почв, предельно допустимая концентрация Hg^{2+} составила 500 мг/л, и при большей концентрации Hg^{2+} рост микроорганизмов отсутствовал [4]. В присутствии 500 мг/л Hg^{2+} лаг-фаза роста составляла 1–2 сут, как и в контрольном варианте (без Hg^{2+}). Возможность адаптации микроорганизмов к повышению концентрации ртути в среде была исключена, так как для посевов на среды с возрастающей концентрацией ртути использовались микроорганизмы, выделенные на среде без металлов.

Стандартный редокс-потенциал реакции восстановления CrO_4^{2-} до Cr(OH)_3 равен +555 мВ, т. е. он находится в зоне термодинамической устойчивости воды (-414 мВ $\leq E'_o \leq +814$ мВ). При увеличении концентрации Cr(VI) от $1,0 \cdot 10^{-8}$ до 1,0 моль/л редокс-потенциал возрастает всего лишь на 178 мВ (от +410 до +588 мВ) и не выходит за пределы указанной зоны [2]. Отсюда следует, что существование микроорганизмов в принципе допустимо даже при одномолярной концентрации (51900 мг/л Cr(VI)), что соответствует 133800 мг/л CrO_4^{2-}). Поэтому микроорганизмы не только могут расти при сверхвысоких концентрациях хромата, по общепринятым представлениям “несовместимых с жизнью”, но и восстанавливать его до нерастворимого гидроксида хрома(III):



Изучение взаимодействия техногенных ассоциаций микроорганизмов (гранулированный препарат МБК) с хроматом при начальной концентрации Cr(VI) 5000 мг/л (около 0,1 моль/л) (см. рис. 1, в) показало, что, как и в варианте с ртутью, микроорганизмы вначале снижали редокс-потенциал до приемлемого для них уровня (фаза А) и лишь затем начинали расти и взаимодействовать с хроматом. Так, в фазе А редокс-потенциал снижался от +580 до +370 мВ, а концентрация Cr(VI) практически не изменялась. И только после снижения редокс-потенциала до +370 мВ в фазах В и С одновременно наблюдали рост микроорганизмов, дальнейшее снижение редокс-потенциала (от +370 до –300 мВ) и уменьшение концентрации Cr(VI) в растворе (от 4500 мг/л до 0). Микроорганизмы техногенных ассоциаций восстанавливали хромат (CrO_4^{2-}) оранжевого цвета до нерастворимого гидроксида хрома ($\text{Cr(OH)}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) голубого цвета (рис. 2, а, см. вклейку).

Теоретические расчеты позволили предположить, что микроорганизмы не только в принципе могут существовать при бактерицидных концентрациях хромата, но и должны быть достаточно широко распространены в природе. Действительно, нами установлено, что



Рис. 2. Рост микроорганизмов в присутствии сверхвысоких концентраций металлов-окислителей (Hg^{2+} , CrO_4^{2-} и Cu^{2+})
a — восстановление CrO_4^{2-} до нерастворимого $\text{Cr}(\text{OH})_3$ микроорганизмами техногенных ассоциаций: *1* — исходный раствор, 5000 мг/л Cr(VI); *2* — осаждение хрома в виде $\text{Cr}(\text{OH})_3$ через 6 сут; *б* — рост на МПА антарктических микроорганизмов В-3202 (*1*), В-3207 (*2*), В-3209 (*3*) при 50000 мг/л Cr(VI) в течение 3 сут; *в* — восстановление CrO_4^{2-} антарктическими микроорганизмами до $\text{Cr}(\text{OH})_3$ (сиреневый цвет) при наличии в среде глюкозы (20 г/л) в качестве донора электронов; *г* — осаждение карбоната меди(II) на гранулах МБК и стенках флакона: *1* — исходный раствор, 10 г/л Cu(II), *2* и *3* — снижение концентрации Cu^{2+} : до 4900 мг/л через 8 сут (*2*), до 100 мг через 12 сут (*3*); *д* — рост антарктических микроорганизмов в присутствии 1000 мг/л Cu^{2+} (посев почвы, 10^8 клеток/г почвы); *е* — восстановление Cu^{2+} до соединений меди(I) коричневого цвета при росте антарктических микроорганизмов

К ст. А.Б. Таширева и др. “Экспериментальное обоснование термодинамического прогнозирования редокс-взаимодействия микроорганизмов с металлами-окислителями (Hg^{2+} , CrO_4^{2-} и Cu^{2+})”

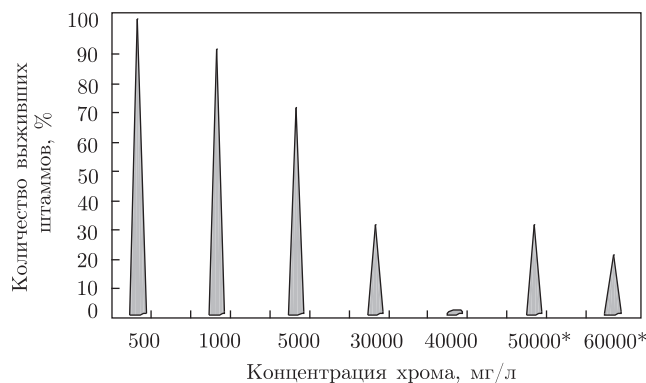


Рис. 3. Повышение устойчивости антарктических штаммов к сверхвысоким концентрациям Cr(VI) в присутствии донора электронов (глюкозы).

* — 20 г глюкозы (в качестве донора электронов) внесено в 1 л МПА

в Западной Антарктике (острова Аргентинского архипелага и примыкающее к ним побережье Антарктического полуострова) распространены хроматрезистентные микроорганизмы. Практически во всех наземных биотопах Антарктики (почва, мох, лишайники, гумус, озерный ил) обнаружены микроорганизмы, устойчивые к высокой концентрации Cr(VI) — 500 мг/л. Так, в образцах этих биотопов содержится до 10^4 – 10^5 клеток/г АСМ образца, растущих на МПА в присутствии 500 мг/л Cr(VI) [9]. Более того, из антарктических почв (Западная Антарктика, Аргентинский архипелаг, о. Галиндез) нами выделены гетеротрофные микроорганизмы, растущие при сверхвысоких концентрациях Cr(VI) [4]. Выделенные микроорганизмы, полирезистентные к металлам, депонированы в Украинскую коллекцию микроорганизмов (УКМ) под номерами В-3201 — В-3210.

Степень устойчивости антарктических микроорганизмов к хромату определяется собственно концентрацией Cr(VI) и, кроме того, зависит от наличия в среде дополнительного источника углерода и энергии. Так, повышение концентрации Cr(VI) от 1000 до 30 000 мг/л Cr(VI) в среде привело к ингибированию роста штаммов В-3201 — В-3210 (рис. 3). При концентрации Cr(VI) 40000 мг/л рост микроорганизмов отсутствовал. Однако внесение в среду глюкозы (20 г/л) в качестве дополнительного источника углерода и энергии существенно повысило устойчивость микроорганизмов к Cr(VI). Так, при 50000 мг/л Cr(VI) уже через 2 сут выросло три штамма (В-3201, В-3202 и В-3207) (см. рис. 2, б и 3). Два из них выросли даже при 60000 мг/л Cr(VI), т. е. при концентрации, превышающей 1 моль/л. Через 4–5 сут роста (на МПА с глюкозой) штрих-культуры приобрели сиренево-голубой цвет, характерный для гидроксида хрома(III) (см. рис. 2, в). Как мы уже сообщали ранее [4], глюкоза, по-видимому, является донором электронов, который позволяет антарктическим микроорганизмам осуществлять защитную сопряженную редокс-реакцию окисления глюкозы ($C_6H_{12}O_6$) и восстановления хромат-аниона (CrO_4^{2-}) до нерастворимого, а значит, и нетоксичного гидроксида хрома(III).

Для реакции $2Cu^{2+} + H_2O + 2e = Cu_2O + 2H^+$ (при концентрации реагирующих компонентов 1 моль/л) Eh равно +440 мВ (рН 4), т. е. редокс-потенциал находится в пределах термодинамической устойчивости воды ($-414 \text{ мВ} \leq E'_o \leq +814 \text{ мВ}$) [2]. Отсюда следует, что микроорганизмы могут расти в присутствии высоких концентраций соединений меди(II) и взаимодействовать с ними. Это теоретическое положение подтверждено экспериментально как на примере техногенных ассоциаций, так и антарктических микроорганизмов.

Так, нами показано, что микроорганизмы гранулированного препарата МБК растут и взаимодействуют с Cu(II) при ее концентрации 10000 мг/л Cu^{2+} (см. рис. 1, *з*). В фазе А микроорганизмы осуществляли корректировку редокс-потенциала. За 4 сут редокс-потенциал снижался от +480 мВ до +360 мВ, и одновременно концентрация Cu^{2+} уменьшалась более чем на 1000 мг/л (от 10000 до 8900 мг/л). В фазе В наблюдали одновременно рост микроорганизмов, снижение редокс-потенциала и уменьшение концентрации Cu^{2+} в растворе (от 8900 до 1600 мг/л). В результате взаимодействия микроорганизмов с Cu^{2+} в фазе В образовался нерастворимый карбонат меди(II), концентрация которого в конце этой фазы составляла 3400 мг/л. Наконец, в фазе С редокс-потенциал снижался до -50 мВ, концентрация Cu^{2+} в растворе уменьшалась до 120 мг/л, а концентрация CuCO_3 составила 5700 мг/л. В процессе взаимодействия микроорганизмов техногенных ассоциаций с Cu^{2+} (10000 мг/л) в течение 14 сут карбонат меди (а возможно, и Cu(OH)_2) оседал на гранулах МБК и стенках флакона в виде зеленовато-голубой пленки (см. рис. 2, *з*).

Медьрезистентные микроорганизмы распространены в исследованном нами регионе Антарктики (Западная Антарктика, Аргентинский архипелаг, биогеографический полигон на о. Галиндез). При высеве образца грунтовой высыпки (юго-восточный сектор полигона) на среду с содержанием 1000 мг/л Cu^{2+} количество выросших на 2-е — 3-тьи сут микроорганизмов составляло 10^8 клеток/г почвы (см. рис. 2, *д*). Из почвы полигона выделены три культуры (В-3201, В-3208 и В-3210), растущие в концентрационном диапазоне 2500–3000 мг/л Cu^{2+} . В процессе роста некоторые штаммы, по-видимому, восстанавливали соединения меди(II) до меди(I), о чем свидетельствовало изменение окрашивания среды от голубого до желто-коричневого, характерного для соединений меди(I) (см. рис. 2, *е*). Таким образом, полученные нами результаты позволили сделать вывод о широком распространении в исследованной нами зоне Антарктики микроорганизмов, устойчивых к сверхвысоким концентрациям Cu(II) — от 1000 до 3000 мг/л.

Проведенные эксперименты показали, что в соответствии с термодинамическими расчетами микроорганизмы могут расти в присутствии сверхвысоких концентраций трех наиболее токсичных металлов-окислителей: 500–1000 мг/л Hg(II) , 50000–60000 мг/л Cr(VI) и 1000–10000 мг/л Cu(II) . Возможность роста микроорганизмов обусловлена тем, что при многократном повышении концентрации металлов их редокс-потенциал остается в пределах зоны термодинамической устойчивости воды. Отсюда следует, что некоторые микроорганизмы способны существовать при таких концентрациях металлов-окислителей, которые на несколько порядков превышают известные бактерицидные концентрации (1–20 мг-ионов/л) этих металлов.

В водных растворах металлы-окислители (Hg^{2+} , CrO_4^{2-} и Cu^{2+}) являются редокс-буферными системами с высокими потенциалами (Eh +920, +555 и +440 мВ). Поэтому микроорганизмы, в соответствии с нашими расчетами, в присутствии указанных металлов используют “компенсаторные” метаболические системы для корректировки редокс-потенциала до таких значений, при которых возможен рост хемоорганотрофных микроорганизмов. Показано, что микроорганизмы в первую очередь снижают редокс-потенциал с +920... +580 до +370... +360 мВ и лишь затем начинают расти и взаимодействовать с металлами.

Микроорганизмы являются донорной редокс-системой, а металлы-окислители — акцепторной. Поэтому разность потенциалов между донорной системой (-200... -400 мВ) и акцепторной (+440... +920 мВ), равная 660–1320 мВ, предопределяет восстановление Hg^{2+} , CrO_4^{2-} и Cu^{2+} микроорганизмами. В целом взаимодействие микроорганизмов с металлами проявляется в восстановлении металлов до нерастворимых форм, а также в осажде-

нии металлов микробными экзометаболитами. Отсюда следует, что техногенные ассоциации и антарктические почвенные микроорганизмы, устойчивые к сверхвысоким концентрациям Hg^{2+} , CrO_4^{2-} и Cu^{2+} , могут быть использованы для создания новых природоохранных биотехнологий, обеспечивающих очистку промышленных сточных вод от широкого спектра металлов практически в любом концентрационном диапазоне.

1. *Таширев А. Б.* Теоретические аспекты взаимодействия микроорганизмов с металлами. Восстановительная трансформация металлов // *Мікробіол. журн.* – 1994. – **56**, № 6. – С. 76–88.
2. *Таширев А. Б., Галингер Э. В., Андреюк Е. И.* Термодинамическое прогнозирование редокс-взаимодействия микроорганизмов с металлами-окислителями (Hg^{2+} , CrO_4^{2-} и Cu^{2+}) // *Доп. НАН України.* – 2008. – № 4. – С. 166–172.
3. *Таширев А. Б., Смирнова Г. Ф., Яновер С. Б., Самчук А. И.* Аккумуляция тяжелых металлов микробным сорбентом // *Мікробіол. журн.* – 1997. – **59**, № 3. – С. 70–79.
4. *Таширев А. Б., Матвеева Н. А., Романовская В. А., Таширева А. А., Рожитко П. В.* Полирезистентность и сверхустойчивость к тяжелым металлам антарктических микроорганизмов // *Доп. НАН України.* – 2007. – № 11. – С. 170–175.
5. *Анализ минерального сырья* / Под ред. Ю. Н. Книпович, Ю. В. Марчевского. – Москва: Госхимиздат, 1959. – 195 с.
6. *Справочник химика* / Под ред. Б. П. Никольского. Т. 4. – Москва; Ленинград: Химия, 1965. – 827 с.
7. *Чернышенко Д. В., Данько Я. Н., Таширев А. Б. и др.* Культиватор для изучения ростовых процессов анаэробных микроорганизмов // *Мікробіол. журн.* – 1990. – **52**, № 6. – С. 90–92.
8. *Таширев А. Б.* Концепция интегральных механизмов аккумуляции металлов синтрофными микробными ассоциациями // *Мікробіол. журн.* – 1999. – **61**, № 5. – С. 78–84.
9. *Таширев А. Б., Романовская В. А., Сиома И. А., Усенко В. П., Таширева А. А., Матвеева Н. А. и др.* Антарктические микроорганизмы, устойчивые к высоким концентрациям Hg^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} и CrO_4^{2-} // *Доп. НАН України.* – 2008. – № 1. – С. 169–176.

*Институт микробиологии и вирусологии
им. Д. К. Заболотного НАН Украины, Киев
Национальный антарктический научный центр
МОН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 20.11.2007