

УДК 550.47:574.24

Прикладные аспекты геохимической экологии микроорганизмов в решении задач экобиотехнологии

© 2020 Н.Б. ГРАДОВА^{1*}, В.В. ЕРМАКОВ², Т.В. ГУСЕВА³, Ю.В. КОВАЛЬСКИЙ²,
В.И. ПАНФИЛОВ¹

¹ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 135480

² Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, 119991

³ Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики», Москва, 115054

*e-mail: gradova_nb@mail.ru

Поступила в редакцию 17.06.2020 г.

После доработки 06.10.2020 г.

Принята к публикации 01.12.2020 г.

В статье представлен новый взгляд на возможности применения микроорганизмов для решения широкого спектра биотехнологических и экологических задач. Приведены примеры современных инноваций в области технологии применения биопрепаратов на основе живых клеток микроорганизмов для биоремедиации нефтезагрязнённых почв и повышения плодородия почв. Подчеркнута значимость микробиологических методов для решения задач Национального проекта «Экология». Показана перспективность и эффективность технологии использования микробной биомассы, обогащённой микроэлементами, для снижения микроэлементов и профилактики биогеохимических эндемий.

Ключевые слова: биогеохимия, биотехнология, геохимическая экология, микроэлементозы, эффективность применения, микробные препараты.

doi: 10.21519/0234-2758-2020-36-6-107-114

Инновационные направления развития биотехнологии в настоящее время определяются расширением её связей с разными отраслями науки и хозяйственной деятельности для получения продуктов и препаратов разного назначения (Материалы российской технологической платформы «Биоиндустрия и биоресурсы — BioTech2030» <http://biotech2030.ru/platforma/o-nas/>). Одним из таких направлений является использование фундаментальных и прикладных аспектов геохимии, а именно — геохимической экологии. Понятие «геохимическая экология» предложено В.В. Ковальским [1] как продолжение исследований В.И. Вернадского и А.П. Виноградова о таксонах биосферы, биогеохимических провинциях и эндемиях [2]. Геохимическая экология — раздел биогеохимии и общей экологии, изучающий закономерности взаимодействия организмов и их сообществ с природной

и техногенной средой, особенности химического элементного состава организмов и геохимической среды, биогеохимические пищевые цепи, биогенную миграцию химических элементов, пороговые и критические концентрации химических элементов в организмах и среде и др. [3]. Проблемы геохимической экологии приобретают особую актуальность в настоящее время в связи с техногенезом биосферы [4]. Исследованные закономерности геохимической экологии определяют направления разработки технологии получения биотехнологических продуктов и препаратов, обеспечивающих снижение дефицита необходимых микроэлементов в трофических цепях, а также технологии применения биопрепаратов для биоремедиации загрязнённых почв и повышения их плодородия, очистки промышленных сточных вод и почв от тяжёлых металлов и др.

Список сокращений: ВОЗ — Всемирная организация здравоохранения, ФАО — Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединённых Наций.

Влияние молибдена на функциональную активность азотобактерина в молибден-недостаточных почвах
Effect of molybdenum on the functional activity of azotobacterin in molybdenum-poor soils

Варианты опыта	Тип почвы	Содержание общего азота, %	Степень повышения содержания азота в почве, %
Нативная почва (рыхление, полив)	Дерново-подзолистая /серая	0,12/0,13	—
Нативная почва+препарат	Дерново-подзолистая /серая	0,13/0,14	8,3/11,5
Нативная почва + препарат +5мг/кг Na ₂ MoO ₄	Дерново-подзолистая /серая	0,14/0,16	16,0/23,0
Нативная почва + препарат +10 мг/кг Na ₂ MoO ₄	Дерново-подзолистая /серая	0,15/0,17	25,0/30,8

Примечание. Характеристика почв: дерново-подзолистая — pH 4,8, серая pH 5,5; содержание подвижной формы железа в подзолистой почве 250,0 мг/кг; в — серой 400,0 мг/кг; содержание молибдена в почвах около 0,1 мг/кг.

Note. Characteristics of soils: pH 4.8 for soddy podzolic soil; pH 5.5 for grey soil; 250.0 mg of Fe (mobile) per kg of soil for podzolic soil; 400 mg of Fe (mobile) per kg soil in grey soil; Mo content about 0.1 mg/kg.

Развитию и реализации идей геохимической экологии и биотехнологии посвящена данная статья.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Биогеохимическая модель гомеостатических регуляторных процессов организмов и их устойчивого функционирования в природных экосистемах основана на положении об адаптированности микроорганизмов, обитающих в почве, к определенным концентрациям и соотношениям химических элементов и влиянии различий в этих характеристиках почв на состав почвенных микроорганизмов [5]. Эти положения определяют требования к условиям применения биопрепаратов, основанных на функциональной активности живых клеток микроорганизмов, для биоремедиации загрязнённых почв и повышения почвенного плодородия. Эффективность применения данных препаратов определяется полнотой использования их биохимического потенциала, активность которого может быть лимитирована отсутствием в среде микроэлементов, входящих в каталитический центр ферментов, что, в свою очередь, может зависеть от почвенно-климатических условий, а также от использования препаратов в дефицитных по данным микроэлементам биогеохимических провинциях [5, 6].

Биопрепарат Азотобактерин, основой которого являются живые клетки азотфиксирующих микроорганизмов *p. Azotobacter chroococcum*, широко применяется продолжительное время. Функциональная азотфиксирующая активность этого препарата определяется ферментом нитрогеназой, каталитический центр которого представлен железо-молибденовым кофактором и зависит

от присутствия молибдена в среде культивирования, а также от содержания в почве конкурирующих с молибденом микроэлементов, таких, как медь, вольфрам и др. [7]. В модельных опытах при исследовании эффективности азотобактерина в обеднённых молибденом дерново-подзолистой (Московская обл.) и серой почве (Астраханская обл.) при внесении молибдата натрия в концентрации 5 и 10 мг/кг содержание азота в почве повышалось до 25–30%. (табл.1). Снижение функциональной активности микробных биопрепаратов в почвах, дефицитных по микроэлементам, обеспечивающих их биохимический потенциал, необходимо учитывать при описании условий применения рекомендуемых практических препаратов.

Наиболее широкое применение в настоящее время для биоремедиации нефтезагрязнённых почв и грунтов в разных почвенно-климатических зонах находят биопрепараты, основанные на функциональной активности живых микроорганизмов, отобранных углеводородокисляющих бактерий или их комплекса с дрожжами. Для биоремедиации нефтезагрязнённых почв северных регионов разработана технология получения препарата иммобилизованных клеток бактерий и дрожжей [8], получены активные модифицированные бактерии [9]. При биоремедиации нефтезагрязнённых почв регионов с вечной мерзлотой показана эффективность применения накопительных культур дрожжей и бактерий, выделенных из почв загрязнённого объекта [10]. Данная технология может быть использована как для восстановления объектов так называемого накопленного экологического ущерба (в том числе экологических «горячих точек» в российской Арктике), так

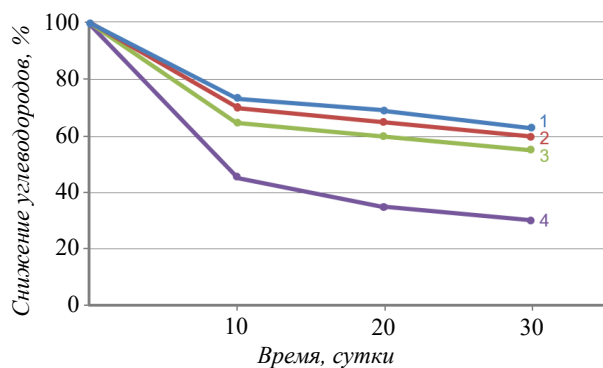


Рис. 1. Влияние железа на функциональную активность биопрепарата при биоремедиации нефтезагрязнённых почв. 1 — нативная почва (рыхление, увлажнение); 2 — внесение биопрепарата; 3 — внесение биопрепарата и 15 мг/кг железа; 4 — внесение биопрепарата и 35 мг/кг железа.

Fig. 1. Effect of iron on the biopreparation (bioproduct) functional activity in the bioremediation of soils polluted by oil (petroleum). 1 — native soil (tillage, watering); 2 — bioproduct is added; 3 — both bioproduct and Iron (15 mg/kg) are added; 4 — both bioproduct and Iron (35 mg/kg) are added.

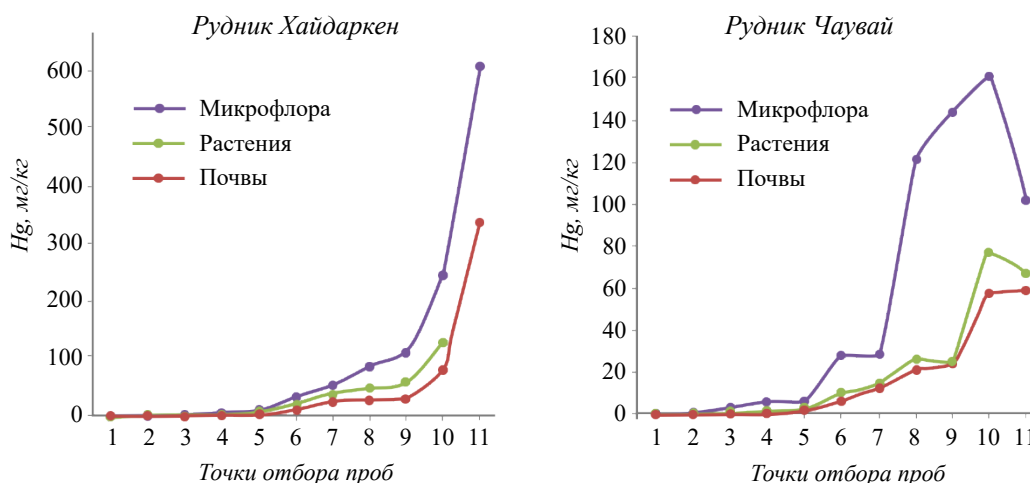


Рис. 2. Сравнительное аккумулярование ртути из почвенной среды почвенной микрофлорой и растениями, произрастающими в пределах рудников Хайдаркен и Чаувай.

Fig. 2. Comparative accumulation of mercury by the soil bacterial flora and plants growing within the boundaries of Khaidargen and Chauvay mines.

и для биоремедиации загрязнённых нефтью участков, требующих немедленных действий (например, для ликвидации последствий аварий). Оба направления весьма значимы в контексте выполнения Национального проекта «Экология», который реализуется в Российской Федерации с конца 2018 г. (Официальный сайт Национального проекта «Экология» <https://xn--80agfniahkdbfn5a8c2gsb.xn--p1ai/>). Одной из составных частей этого Национального проекта является федеральный проект «Чистая страна», посвящённый ликвидации объектов накопленного экологического вреда на всей территории России, включая территории расположения объектов газо- и нефтедобычи в северных и южных регионах (Материалы федерального проекта «Чистая страна» <http://www.vniiecolology.ru/index.php/natsionalnyj-proekt-chistaya-strana/obshchaya-informatsiya>).

В активный центр ферментов, участвующих в окислении углеводов, входит железо, присутствие которого в почве необходимо для обеспечения биохимического потенциала

углеводородокисляющих микроорганизмов. Экспериментально показано [11], что при внесении в загрязнённую нефтью серую почву (Астраханская обл.) биопрепарата, включающего штаммы бактерий *Rhodococcus erythropolis* и дрожжей *Candida tropicalis*, на 28 суток экспозиции в контрольном варианте опыта (почва рыхлилась и увлажнялась) содержание углеводов снизилось на 41%. В контрольных образцах содержание углеводов снизилось на 37%. При использовании биопрепарата в комплексе с солью железа ($FeSO_4$) в концентрации 15 и 35 мг/кг содержание углеводов снижалось, соответственно, на 70% и 55% (рис. 1). В связи с этим очевидно, что при обследовании почв объектов, подлежащих биоремедиации, необходимо определять содержание подвижных форм железа для эффективного использования биопрепаратов.

В результате геохимических исследований была установлена важная биогеохимическая функция микроорганизмов, превышающая функцию почвы и растений в биогенной миграции

химических элементов в биосфере [12]. Сравнительное аккумулятивное поведение ртути почвенной микрофлорой и растениями, произрастающими в пределах рудников Хайдаркен и Чаувай (Кыргызстан), представлено на рис. 2.

Высокая аккумулятивная способность микроорганизмов определена по отношению к ряду микроэлементов, в том числе, таких токсических, как ртуть, мышьяк, сурьма, свинец и др., степень аккумуляции которых зависит от их концентрации в почве (рис. 3).

Выявленные закономерности являются основой для разработки технологии снижения содержания металлов в природных и техногенных средах с использованием микроорганизмов. Так, при исследовании динамики и кинетики сорбции из сточных вод производства искусственных волокон разных концентраций цинка (^{65}Zn) биомассой гриба *Aspergillus niger* была показана перспективность её использования для очистки промышленных сточных вод от высоких концентраций металлов при разных технологических решениях. Экспериментально показано, что на стационарной фазе развития культуры аспергиллов при высоком содержании цинка (до 40–50 г/л) в среде культивирования он с высокой активностью накапливался в биомассе, что обусловлено физико-химическими процессами его сорбции. Содержание цинка в биомассе достигало 13 г/кг биомассы. При более низких концентрациях этого металла в среде (до 20 г/л) цинка определялось до 2 г/кг биомассы (рис. 4). Исследование распределения цинка (^{65}Zn) в биомассе показало, что как при низкой, так и при высокой его концентрации в среде в полимерах клетки локализовалось 11–12,5% от содержащегося в биомассе. Остальное количество цинка удалялось методом десорбции [13].

Актуальность проблемы снижения дефицита белка и коррекции нутрицевтиков (витамины, микроэлементы) в трофической цепи, обусловленной необходимостью обеспечения рационального питания человека, определена международными организациями ФАО/ВОЗ [14]. Недостаток микроэлементов в трофических цепях, развитие эндемий, связанных с биогеохимическими провинциями, в настоящее время усугубляется рядом социальных факторов, в частности, изменением структуры питания человека, снижением разнообразия используемых традиционных натуральных продуктов, а также техногенным загрязнением окружающей среды. Загрязнение экосистем тяжёлыми металлами, широкое применение фосфорных удобрений, кислотные дожди, увеличение содержания в экосистемах соединений серы снижает подвижность многих неорганических

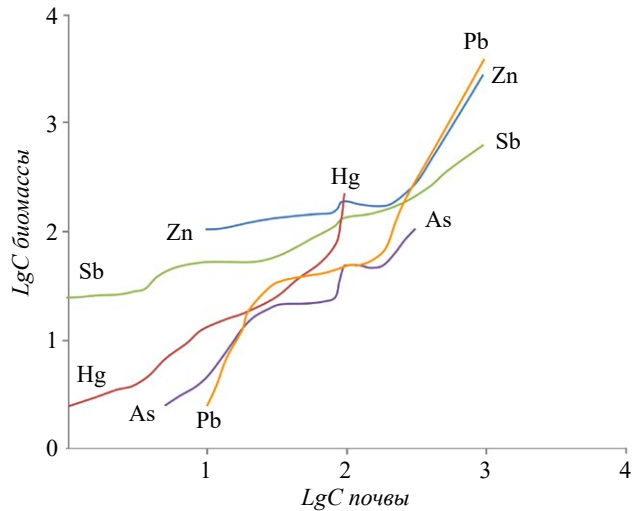


Рис. 3. Аккумуляция микроэлементов биомассой почвенных микроорганизмов.

Fig. 3. Accumulation of microelements by soil microorganisms.

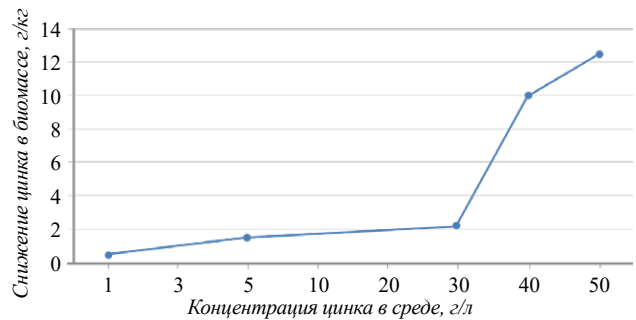


Рис. 4. Зависимость количества цинка, включенного в биомассу грибов *Aspergillus niger*, от его концентрации в среде.

Fig. 4. Amount of Zn incorporated into the biomass of *Aspergillus niger* fungi as a function of its concentration in the medium.

соединений в почве, конкурирует с рядом микроэлементов, блокирует их доступность и поток в трофические цепи, что обуславливает широкое распространение микроэлементозов [12, 14, 15].

Увеличение в экосистемах содержания соединений серы, конкурирующих с селеном, привело к снижению его статуса в трофических цепях. Микроэлемент селен обладает высокой биологической активностью, является антиоксидантом, поддерживает гомеостаз организма, обладает радиопротекторными свойствами. Функционально селен рассматривается как ультрамикроэлемент, поскольку выявлены незначительные различия между физиологически активными и токсичными его концентрациями [14, 15, 17, 19].

На основании исследований влияния селена на рост микроорганизмов и закономерностей

их обогащения этим элементом разработана технология получения микробной биомассы с его повышенным содержанием. Исследования выполнены при культивировании дрожжей рода *Candida* при использовании в качестве сырья n-парафинов нефти, этанола, целлюлозосодержащих субстратов (отходов производства стевиозита); при культивировании дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* на средах с мелассой, дрожжей *S.carlbergensis* на гидролизованном зерне, дрожжей *Kluveromyces marxianus* на молочной сыворотке и фотосинтезирующих цианобактерий *p.Spirulina* в присутствии NaHCO_3 [16, 17, 20–22].

При повышении концентрации селена в среде культивирования от 2–3 мг/л до 10–20 мг/л уровень его накопления в биомассе повышался, соответственно, с 80 мг/кг до 900 мг/кг (рис. 5).

В то же время при определённой для каждого штамма дрожжей концентрации селена в среде наблюдается резкое снижение активности роста и отсутствие влияния дальнейшего повышения его концентрации на рост клеток (рис. 6).

На уровень накопления селена в биомассе микроорганизмов существенное влияние оказывает концентрация серы в среде культивирования. При повышении концентрации этого элемента от 6,8 до 193,0 мг/л возрастает активность роста дрожжей и снижается уровень накопления селена в биомассе с 106,9 до 14,9 мг/кг.

Для эффективного использования препаратов, обогащённых селеном, большое значение имеет строгое их дозирование при использовании. Биологическая ценность и усвояемость селена зависит от его содержания в препарате в органически связанной форме, в то время как в неорганической форме селен проявляет токсичность при определенном уровне его концентраций в препарате [20].

Исследования закономерностей поступления селена (^{75}Se) и его распределение по структурам и фракциям клеток дрожжей, содержащих 300 мг/кг селена, показали, что в клеточной стенке содержалось 16% селена, в мембранах клетки — 32%, в аминокислотах и растворимых белках — 52%, из них 13% содержалось в селеноаминокислотах, половина которых находилась в виде свободных аминокислот [20]. Содержание неорганического селена (удаляемого диализом) зависело от его содержания в биомассе и составляло 14–25%. Полученные данные свидетельствуют о высокой биологической ценности селена, большая часть которого содержится в органических компонентах клетки при в обогащении биомассы микроорганизмов этим элементом. Микробная биомасса, кормовые белково-витаминные

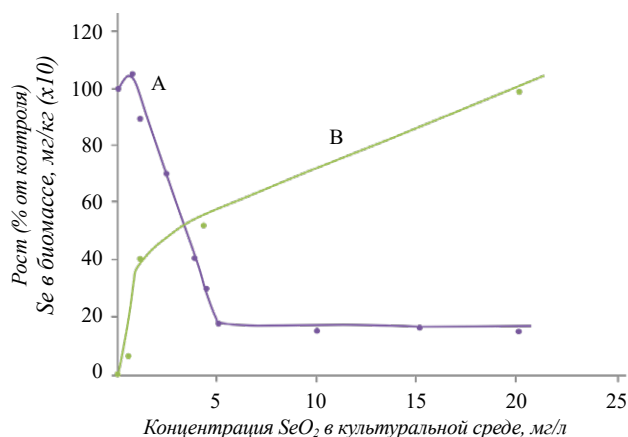


Рис. 5. Влияние концентрации селена в среде культивирования в присутствии этанола на активность роста дрожжей *Candida utilis* и накопление селена в биомассе (А — активность роста, Б — аккумулярование селена в биомассе).

Fig. 5. Effect of Selenium concentration in the cultivation medium (in ethanol presence) on the activity of *Candida utilis* yeast growth and selenium accumulation in the biomass (A — growth activity, B — Se accumulation).

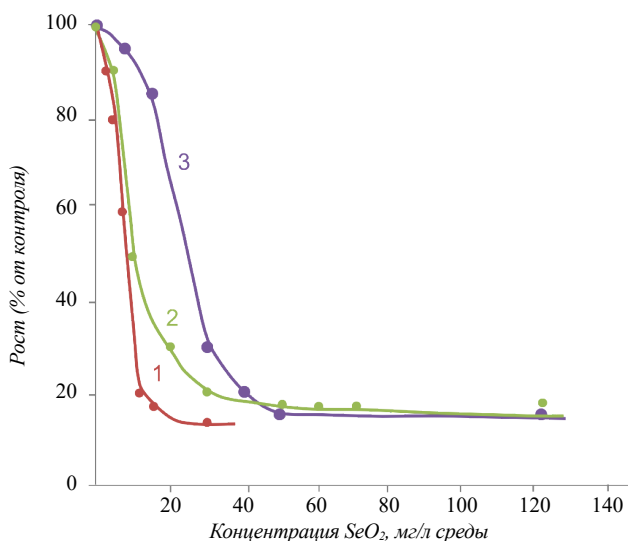


Рис. 6. Влияние концентраций SeO_2 на рост: 1 — цианобактерий; 2, 3 — дрожжей на среде с n-алканами.

Fig. 6. Effect of SeO_2 concentrations on the growth of: 1 — cyanobacteriae, 2,3 — yeast on the n-alkanes containing medium.

добавки в зависимости от содержания селена могут использоваться в качестве кормовых, профилактических и ветеринарно-лечебных препаратов в селено-дефицитных биогеохимических провинциях, в техногенных зонах и зонах радиоактивно загрязнения [16, 20, 22].

Разработаны режимы получения биомассы дрожжей, обогащённой йодом [21]. При исследовании влияния КJ на рост дрожжей и его

накопления в биомассе было показано, что йод не оказывает влияния на активность роста клеток *Yarrowia lipolytica* на целлюлозосодержащих субстратах в широком диапазоне концентраций 0,05 до 45,0 г/л. Однако при концентрации KJ 100 г/л рост дрожжей полностью ингибировался.

При исследовании закономерностей йодирования микробной биомассы установлено, что введение йода в клетки дрожжей основывается на реакции окисления йодида в присутствии окислителя (перекись водорода) с образованием молекулярного йода, который встраивается в биополимеры клетки, в частности, в тирозин, а также находится в водорастворимой фракции. Уровень обогащения биомассы йодом возрастает при повышении его концентрации в среде культивирования (табл. 2).

При исследовании закономерностей включения йода (^{125}J) в дрожжи при их культивировании на целлюлозосодержащих отходах растениеводства показано, что йод включается не только в клетки дрожжей, но и в целлюлозосодержащие компоненты непрогидролизованых остатков сырья [16]. Так, если в биомассе дрожжей определялось 0,37 мкг йода/г, то в шроте и стеблях стевии (*Stevia rebaudiana*), соответственно, 300 и 130 мкг/г. При этом 75% йода, включенного в растительную массу стевии, ковалентно связано с белками, а около 20% связано с низкомолекулярными органическими соединениями по типу йодтирозина.

Разработаны режимы, обеспечивающие одновременное обогащение дрожжей:

- **селеном и йодом** при их культивировании на отходах производства стевиозида [16, 21] и на углеводсодержащих средах. Получен продукт, содержащий селена 187 мг/кг и йода — около 500 мг/кг;
- **селеном, йодом и железом.** Присутствие в среде культивирования железа в широком диапазоне концентраций от 1,0 до 500 мг/л не оказывает существенного влияния на рост дрожжей и накопление в биомассе селена и йода. При культивировании пивных дрожжей на углеводсодержащих средах с содержанием селена до 825 мг/кг, йода — 740 мг/кг и железа — 1,3 г/кг получены биологически активные препараты, которые могут быть использованы в качестве ветеринарно-лечебных.

Результаты исследования закономерностей обогащения микробной биомассы микроэлементами определяют перспективность развития данного направления для коррекции содержания необходимых микроэлементов в трофических цепях и снижения уровня микроэлементозов.

Таблица 2

Влияние концентрации KJ в среде на содержание йода (^{125}J) в биомассе дрожжей *Yarrowia lipolytica*, культивируемых на отходах производства стевиозида
Effect of medium KJ concentration on the concentration of Iodine in the biomass of yeast *Yarrowia lipolytica* cultivated on the waste of stevioside production

Содержание йода в среде культивирования, мг/л	Содержание йода в биомассе, мг/кг
1,0	14,0
5,0	92,0
15,0	340,0
90,0	740,0

На основании исследований влияния на рост микроорганизмов микроэлементов селена и йода и закономерностей их включения в клетки были разработаны технологии управляемого культивирования дрожжей на разных видах сырья, обеспечивающие получение микробной биомассы с заданным содержанием этих микроэлементов, включённых в органические компоненты клеток, что определяет высокую биологическую ценность данных продуктов [24].

На основании биогеохимических идей В.И. Вернадского и принципов геохимической экологии В.В. Ковальского в России и ряде других стран были разработаны технологии получения разного рода препаратов, премиксов для коррекции микроэлементозов животных, человека и растений, решена проблема получения микроудобрений. При использовании методов молекулярной генетики, биотехнологии и геохимической экологии получены эффективные препараты, содержащие не только микроэлементы — йод, селен, и железо, но также кобальт и молибден, применяемые для коррекции микроэлементозов животных и человека.

Специфика биотехнологических процессов, свойств биотехнологических препаратов и продуктов, основанных на процессах микробного биосинтеза, определяет их экологичность и эффективность использования для решения практических задач биогеохимии, а также и необходимость использования биогеохимических закономерностей для обеспечения биотехнологического потенциала микробных препаратов при их применении, в частности, в почвенных экосистемах.

Разработанные технологии биоремедиации нефтезагрязнённых почв и грунтов могут быть широко и эффективно использованы при выполнении федерального проекта «Чистая страна», направленного на ликвидацию накопленного ущерба, в частности, при биоремедиации

нефтезагрязнённых почв северных территорий и регионов с вечной мерзлотой, в которых идентифицирован ряд экологических «горячих точек», в том числе, загрязнённых нефтью участков, требующих скорейшего восстановления.

Биологическая ценность микроэлементов, включённых в органические компоненты клетки, доступность сырьевых источников (природный газ, отходы пищевой промышленности и сельского хозяйства), промышленный опыт производства микробной биомассы как на промышленных, так и на возобновляемых видах сырья, а также опыт применения микробной биомассы в качестве кормовых добавок [23] и разработанные технологии обогащения биомассы дрожжей микроэлементами делают использование кормовых добавок, микробной биомассы с заданным содержанием микроэлементов, перспективным и эффективным направлением для коррекции потока микроэлементов в трофической цепи и коррекции микроэлементозов в биогеохимических провинциях и техногенных зонах

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковальский В.В. Геохимическая экология. Очерки. М.: Наука, 1974, 229 с.
2. Вернадский В.И. Биогеохимические очерки (1922–1932 гг.). М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1940. 250 с.
3. Ермаков В.В., Карпова Е.А., Корж В.Д., Остроумов С.А. Инновационные аспекты биогеохимии. М.: ГЕОХИ РАН, 2012. 345 с.
4. Ковальский В.В. Проблемы биогеохимии микроэлементов и геохимической экологии. Избранные труды. Отв. ред., авт. вступ. ст. Л. К. Эрнст; сост. Ю.В. Ковальский. М.: Россельхозакадемия, 2009, 357 с.
5. Летунова С.В., Ковальский В.В. Геохимическая экология микроорганизмов. М.: Наука, 1978, 247 с.
6. Ermakov V.V., Jovanovic L.N. Biodiversity and the biosphere technogenesis. *Ecologica*, 2010, 17 (58), 77–85.
7. Градова Н.Б. Влияние в реализации биохимического потенциала микроорганизмов на функциональную активность микробных биопрепаратов. *Материалы международного конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития»*. 2017, 459–460.
8. Пыстина Н.Б., Листов Е.Л., Балакирев И.В., Никишов А.С. и др. Разработка биосорбента на основе углеродородокисляющих микроорганизмов, иммобилизованном на гидрофобизированном торфе. *Газовая промышленность*, 2013, 2, 82–85.
9. Филонов А.Е. Роль плазмид в биодеградации углеродородов. *Материалы международного конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития»*. 2017, 460–462.
10. Ерофеевская Л.А. Биоремедиация мерзлотных почв, загрязнённых тяжёлыми фракциями нефти. Труды II Всероссийской научной конференции «Биоразнообразие экосистем крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана». 2013, 508–510.
11. Градова Н.Б., Иванова Д.П. Влияние микроэlementного состава почв на функциональную активность биопрепаратов, применяемых для повышения плодородия и биоремедиации почв. *Актуальная биотехнология*, 2016, 3 (18), 85.
12. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Сафонов В.А. Биогеохимическая индикация микроэлементозов. М.: Изд-во РАН, 2018. 386 с.
13. Рачинский В.В., Давидова Е.Г., Градова Н.Б., Третьякова В.П. и др. Поглощение цинка из питательной среды культурами *Trichosporon capitatum* и *Aspergillus niger*. *Прикладная биохимия и микробиология*, 1975, 11(6), 880–884.
14. “WHO/FAO/UNU Report: Energy and Protein Requirements”, 1985
15. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф. Геохимическая экология животных. М.: Наука, 2008. 310 с.
16. Цугкиева Е.Б., Скаблов Н.С., Градова Н.Б. Обогащение йодом и селеном белково-углеводной кормовой добавки на основе отходов производства стевизоида. *Биотехнология*, 2007, 2, 59–68.
17. Gradova N. The use of microbiological synthesis products for correction of microelementoses. *Ecologica*, 2013, 20(72), 575–580.
18. Ермаков В.В., Ковальский В.В. Биологическое значение селена. М.: Наука, 1974. 300 с..
19. Видершпан А.Н., Бойко Е.В., Чигинцова А.Е., Головацкая И.Ф. Селен как регулятор роста клеточной культуры *Lychnischal sedonica* L. *Материалы международного конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития»*. 2017, 336–338.
20. Жильцова Т.В., Белов А.П., Градова Н.Б. Накопление и распределение селена в клетках, обогащённых селеном дрожжей р. *Candida*. *Прикладная биохимия и микробиология*, 1998, 34(2), 86–88.
21. Галочкина Н.А., Глотова И.А. Биотехнология новых пищевых и кормовых источников органического селена. *Материалы международного конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития»*. 2017, 417–418.
22. Gradova N.B., Sukhinina E., Babusenka E., Baum I. Growth of *Spirulina* on Selenium Containing Media. *J. of Biotechnology*, 2001, 14, 244–247.
23. Быков В.А., Винаров А.А., Градова Н.Б., Ковальский Ю.В. Строители России XX-XXI век. Химический комплекс. Раздел «Микробиологическая промышленность». М.: Мастер, 2008. С.406–424.
24. Градова Н.Б. Микробная биомасса — многофункциональная биологически активная кормовая добавка. *Доклады ТСХА*, 2016, 288(1), 290–294.

Applied Aspects of the Geochemical Ecology of Micoorganisms Used for Solving Ecobiotechnological Tasks

N.B. GRADOVA¹, V.V. ERMAKOV², T.V. GUSEVA³, Yu.V. KOVALSKY², V.I. PANFILOV¹

¹ *Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (MUCTR), Moscow 135480, Russia*

² *Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences Moscow, 119991, Russia*

³ *Research Institute “Environmental Industrial Policy Centre”, Moscow, 115054, Russia*

*e-mail: gradova_nb@mail.ru

Received June 17, 2020

Revised October 6, 2020

Accepted December 1, 2020

Abstract—The article presents a new view on opportunities for using microorganisms to achieve a wide range of biotechnological and environmental objectives. Examples of recent innovations in applying biologicals based on living microbial cells to the remediation of oil polluted soils and enhancing soil fertility are given. The significance of microbiological solutions for achieving the goals of the National Project “Environment/Ecology” is emphasized. The prospects and effectiveness of technologies for the use of microbial biomass enriched with microelements to correct microelementoses and prevent biogeochemical endemics are demonstrated.

Keywords: biogeochemistry, biotechnology, geochemical ecology, microelementosis, effectiveness of application, microbial bio-products

doi: 10.21519/0234-2758-2020-36-6-107-114