

УДК 579.26

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ФУНКЦИЙ АНТАРКТИЧЕСКИХ НАЗЕМНЫХ МИКРОБНЫХ ЦЕНОЗОВ

Таширев А.Б.

*Институт микробиологии и вирусологии им. Д.К.Заболотного НАН Украины, Киев,
ул. Ак. Заболотного, 154, tach2007@ukr.net*

Комплексные исследования структуры и функций антарктических наземных микробных ценозов.

А.Б. Таширев

Реферат. Проведены комплексные исследования по изучению структуры и функций антарктических микробных ценозов и формированию множественных механизмов адаптации микроорганизмов к экстремальным факторам окружающей среды Антарктики. В качестве модельных экосистем использованы субполярные термостатированные оазисы на островах, расположенных в проливах Лемейр и Пенола вдоль побережья Антарктического полуострова (зона 30 x 60 км). Впервые показано наличие в биотопах субполярных термостатированных антарктических оазисов (в т.ч. на вертикальных скалах) микроорганизмов, устойчивых к УФ излучению, антибиотикам и токсичным металлам. Полученные данные свидетельствуют о возможности создания на основе экстремофильных микроорганизмов экспресс-индикаторных систем для оценки влияния климатических факторов на функционирование антарктической биоты. С использованием GIS-систем и 3D-моделей разработаны интегрированные модели адаптации микробных ценозов к экстремальным климатическим факторам. Сформулированы основные положения о функционировании ледовых водорослево-бактериальных ценозов, которые, по-видимому, играют существенную роль в формировании глобальных векторных потоков биогенных элементов и балансе парниковых газов.

Ключевые слова: структура, функция, микробные ценозы, модельные экосистемы.

Комплексні дослідження структури і функцій антарктичних наземних мікробних ценозів.

О.Б. Таширев.

Реферат. Проведено комплексні дослідження по вивченню структури і функцій антарктичних мікробних ценозів та формуванню множинних механізмів адаптації мікроорганізмів до екстремальних факторів антарктичного довкілля. У якості модельних екосистем використані субполярні термостатовані оазиси на островах, розташованих у протоках Лемейр та Пенола вздовж узбережжя Антарктичного півострова (зона 30 x 60 км). Вперше показано наявність у біотопах субполярних термостатованих антарктичних оазисів (у т.ч. на вертикальних скелях) мікроорганізмів, стійких до УФ-випромінювання, антибіотиків та токсичних металів. Отримані дані свідчать про можливість створення на основі екстремофілних мікроорганізмів експрес-індикаторних систем для оцінки впливу кліматичних факторів на функціонування антарктичної біоти. З використанням GIS-систем та 3D-моделей розроблено інтегровані моделі адаптації мікробних ценозів до екстремальних кліматичних факторів. Сформульовано основні положення щодо функціонування льодових водорослево-бактеріальних ценозів, які, можливо, відіграють істотну роль у формуванні глобальних векторних потоків біогенних елементів та балансі парникових газів.

Ключові слова: структура, функція, мікробні ценози, модельні екосистеми.

Complex researches of structure and function of Antarctic terrestrial microbial communities.

O.B. Tashyrev.

Abstract. Complex researches on studying structure and functions Antarctic microbial communities and formation of plural mechanisms of adaptation of microorganisms to extreme environmental factors of Antarctic are carried out. As model ecosystems subpolar thermostatic oases on the islands located in passages Lemaire and Penola along coast of Antarctic peninsula (a zone 30 x 60 km) are used. For the first time presence in

environments of subpolar thermostatic Antarctic oases (including on vertical rocks) microorganisms, resistant to UV-radiation, antibiotics and toxic metals is shown. Obtained data testify to an opportunity of development on the basis of extremophilic microorganisms the express-indicator systems for an estimation of influence of climatic factors on functioning of Antarctic biota. With use of GIS-systems and 3D-models the integrated models of microbial communities' adaptation to extreme climatic factors are developed. Original positions about functioning ice algal-bacterial communities which apparently, play an essential role in formation of global vector streams of biogenic elements and balance of hotbed gases are formulated.

Key words: structure, function, microbial communities, model ecosystems.

С начала XX века и по настоящее время микробиологические исследования в Арктике и Антарктике в основном направлены на поиск и изучение экстремофильных микроорганизмов.

Классические методы, общепринятые в геологической, водной и почвенной микробиологии, к сожалению, практически не использовались при исследовании антарктических микроорганизмов.

Именно поэтому в 2001 г. мы приступили к комплексным исследованиям структуры и функций антарктических наземных микробных ценозов. Главным объектом исследований является биогеографический полигон на о. Галиндез в 20 минутах ходьбы от станции Академик Вернадский. На полигоне на протяжении 9 лет проводятся комплексные биологические и геодезические исследования: отбор образцов, картирование биотопов, характеристика организмов, образующие экосистемы, и т.д. Полигон – это скалистый мыс высотой 58 м. Вверху скалы сливаются с реликтовым ледником, переходят в обширные моховые поля с почвой и гнездовьями птиц, и далее – в скальные обрывы высотой 10–15 метров. Внизу полигона находится озеро с мощными иловыми отложениями. С помощью GPS и GIS-методов созданы топографическая карта и 3D-модель полигона. На них отражены основные ландшафтные элементы, типовые биотопы и сеть позиционированных точек длительного мониторинга – около 150 точек.

Проведены геохимические исследования геологических образцов и организмов по содержанию 20 химических элементов, концентрации общего углерода и почвенных гуминовых кислот (рис. 1).

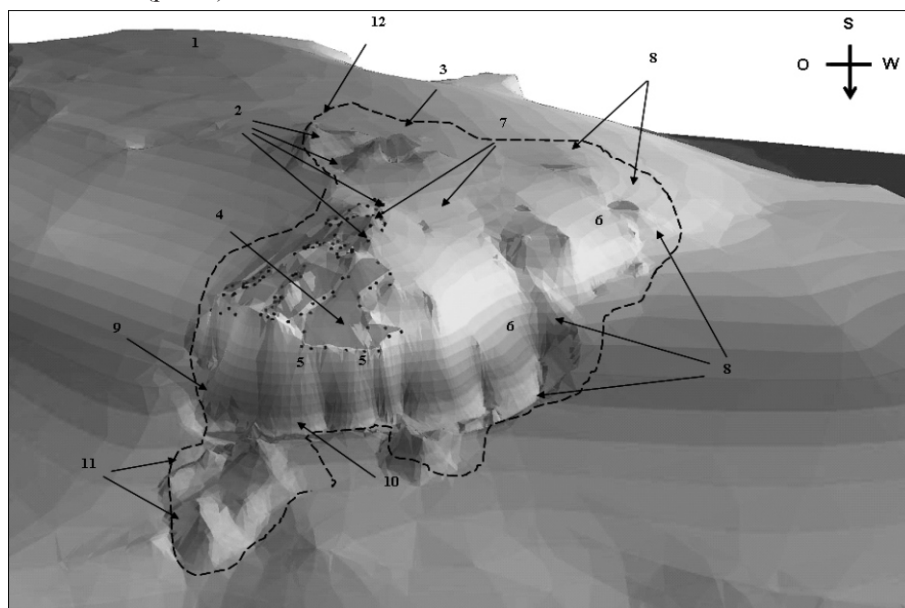


Рис. 1. Биогеографический полигон (о. Галиндез), 3D модель.

Полигон представляет собой субполярный термостатированный оазис, на котором имеются все виды биотопов – ледовые водорослево-бактериальные пленки, накипные лишайники, почва, мох, трава и т.д. (рис.2).



Рис. 2. Биогеографический разрез полигона.

Главным результатом и достижением микробиологических исследований является то, что впервые на репрезентативном объекте, субполярном антарктическом оазисе, изучены структура и функции антарктических микробных ценозов (рис.3)

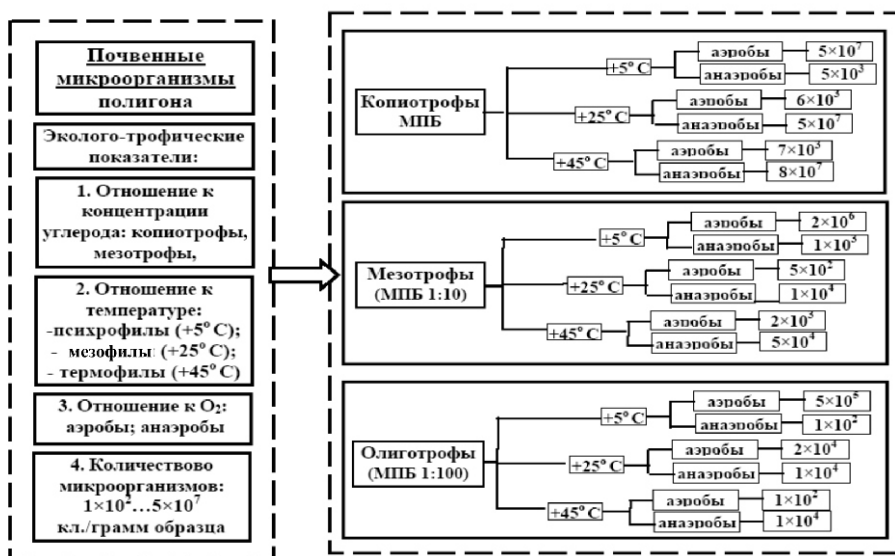


Рис. 3. Комплексная характеристика физиологических групп почвенных микробных ценозов полигона (МПБ – мясо-пептонный бульон).

Комплексные исследования проведены классическими методами общей, почвенной и геологической микробиологии в сочетании с современными методами стереометрического моделирования. Для Антарктики характерны низкие температуры и малое содержание органических соединений в биотопах. Поэтому считается, что там преобладают психрофильные олигокарбофилы, т.е. микроорганизмы, растущие при низких температурах и малом содержании органических веществ [Таширев О.Б., Таширева Г.О., 2004]. Это действительно подтвердилось при количественном учете физиологических групп микроорганизмов. Однако мы также установили, что в почвах полигона в высокой концентрации присутствуют микроорганизмы, растущие при средней и высокой концентрации углерода (т.е. мезотрофы и копитотрофы) (рис.4).

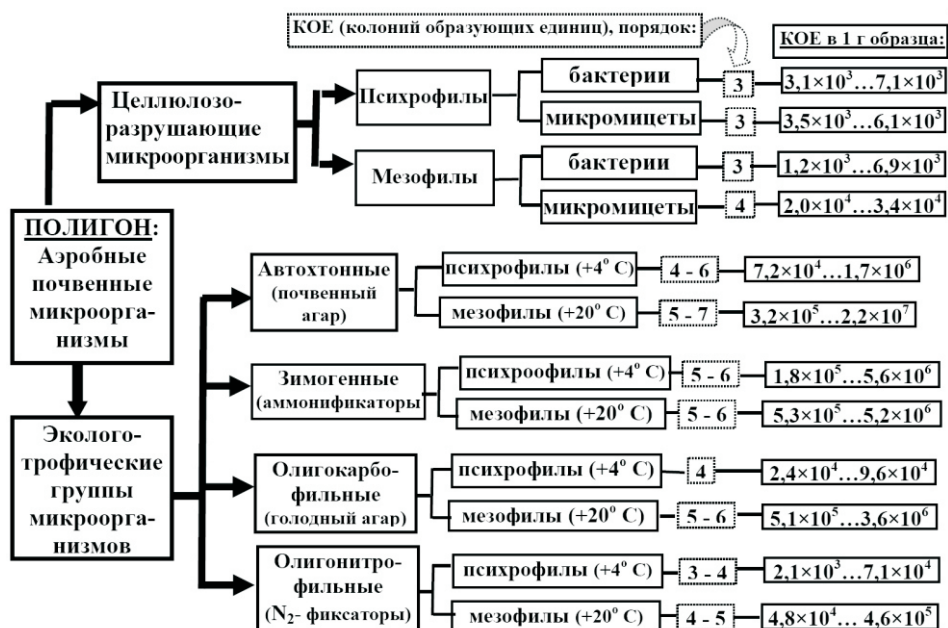


Рис. 4. Эколого-трофическая характеристика микробных ценозов полигона.

Кроме того, в почве широко распространены не только психрофильные, но и мезофильные и даже термофильные микроорганизмы (т.е. растущие при температурах 25 и 45 °С соответственно). По-видимому, широкое распространение на полигоне **копитотрофных** и термофильных микроорганизмов связано с орнитофауной. Новым и важным результатом является принципиальное сходство структуры микробных ценозов субполярного оазиса и регионов с умеренным климатом (условно – «европейские почвы»). Иначе говоря, и в антарктических, и в «европейских» почвах присутствуют все указанные эколого-трофические группы: автохтонные, зимогенные и т.д. Концентрация микроорганизмов в этих группах высокая – в среднем от 10^5 до 10^6 степени клеток на 1 г образца [Таширев О.Б., Таширева Г.О., 2004]. Отличия заключаются в том, что в целом концентрация хемоорганотрофных микроорганизмов в антарктических почвах на 2-3 порядка меньше, чем в почвах Европы. Также закономерно, что в почвах полигона количество целлюлозоразрушающих микроорганизмов мало, т.к. высшие растения не образуют сплошного покрова.

В антарктических почвах присутствуют все физиологические группы микроорганизмов, реализующие полный, замкнутый редокс-цикл углерода, от CO_2 и до CH_4 (рис. 5). О потенциально высокой биогеохимической активности микроорганизмов цикла углерода свидетельствует их высокая концентрация – 10^4 – 10^6 клеток/г образца.

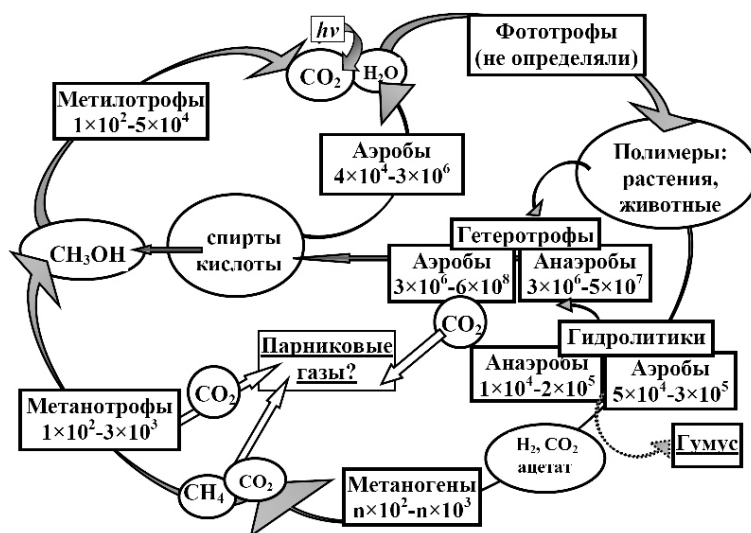


Рис. 5. Замкнутый редокс-цикл углерода: физиологические группы микроорганизмов. Аналогичные закономерности получены и для микробного цикла азота (рис. 6).

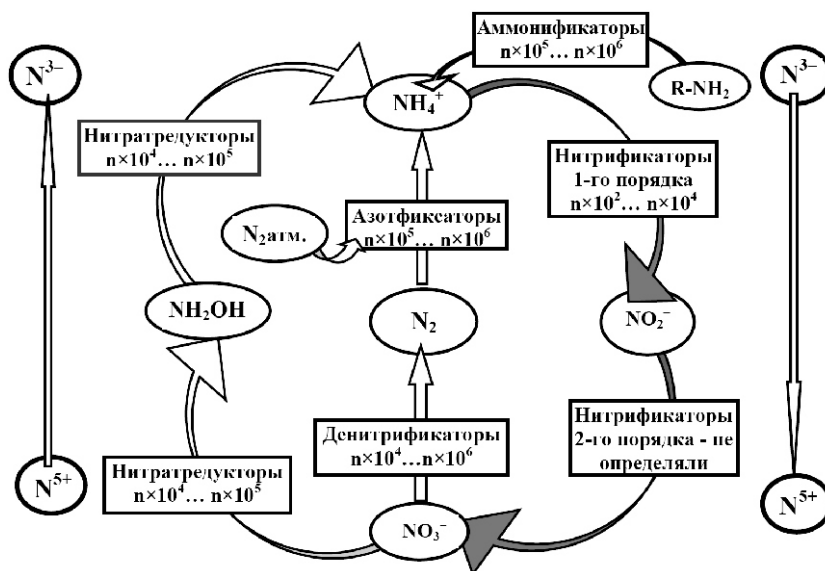


Рис. 6. Замкнутый редокс-цикл азота: физиологические группы микроорганизмов.

Цикл азота также является замкнутым (от N^{5+} до N^{3-}). Концентрация клеток также высокая, 10^4 – 10^6 клеток/г образца. Диверсификация физиологических групп цикла углерода и азота, а также высокая концентрация микроорганизмов позволяют предположить, что они формируют интегральные потоки элементов. И прежде всего – это вовлечение CO_2 и атмосферного азота в биогеохимические циклы в антарктических биотопах.

Важной характеристикой микробных экосистем является их гомеостаз, т.е. способность сохранять стабильность при воздействии экстремальных, или стрессовых, факторов. К таким

факторам относятся УФ-радиация, органические ксенобиотики, антибиотики и токсичные металлы. Мы выбрали в качестве индикаторного стресс-фактора медь в форме двухвалентного катиона Cu^{2+} , т.к. это сильный ингибитор. Ожидалось, что уже при концентрации 5–10 мг/л будет проявляться полное подавление роста микроорганизмов, т.к. в этом диапазоне медь является бактерицидной для подавляющего большинства хемоорганотрофных микроорганизмов.

Однако неожиданно мы обнаружили явление металлрезистентности почвенных микроорганизмов. Антарктические микроорганизмы оказались весьма устойчивыми к этому стрессовому фактору. При 200 мг/л Cu^{2+} количество клеток снижалось на порядок [Matveeva, 2006]. Но дальнейшее 5-кратное повышение концентрации Cu^{2+} (с 200 до 1000 мг/л) практически не влияло на микроорганизмы; их концентрация даже при 1000 мг/л Cu^{2+} составляла десятки млн. клеток/г почвы. Этот факт свидетельствует о сверхустойчивости антарктических почвенных микроорганизмов к меди. Далее мы провели системный количественный учет Cu^{2+} -резистентных микроорганизмов в биотопах полигона. Полученные данные включены в стереометрическую 3D-модель полигона. Медьрезистентные микроорганизмы широко распространены на полигоне [Tashyreva, 2006]. Они обнаружены во всех биотопах полигона, таких как скалы, накипные лишайники, мох, трава, почва, озерные илы. Их количество составляет 10^5 – 10^6 клеток/г образца (рис. 7).

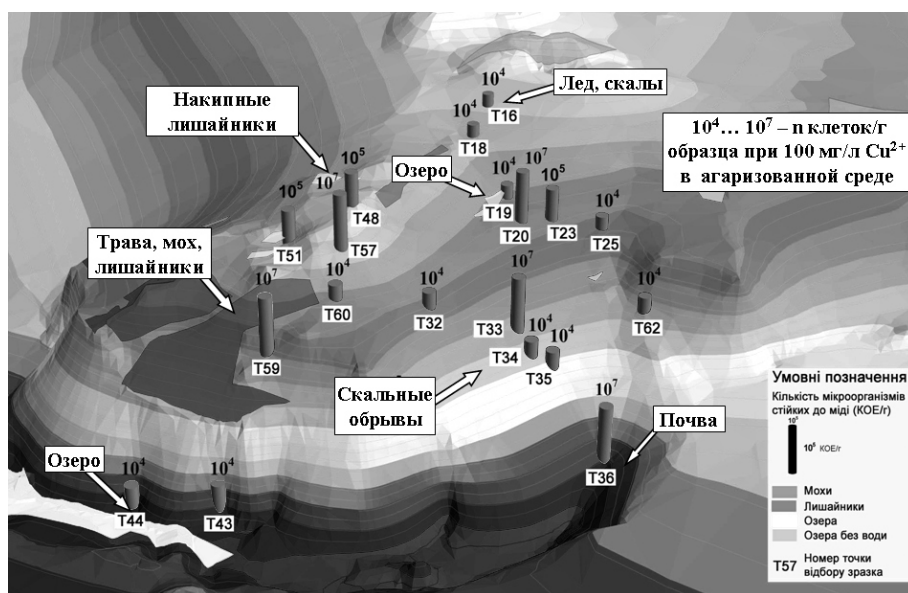


Рис. 7. Структурно-функциональная 3D-модель распределения Cu^{2+} -резистентных микроорганизмов в биотопах полигона.

Для микроорганизмов характерно явление «сцепленной» устойчивости к нескольким токсичным металлам (рис. 8). Мы выбрали в качестве «индикаторных» 3 наиболее токсичных металла: Hg^{2+} , Cd^{2+} и хромат. Это металлы являются как сильными окислителями, так и заместителями, и уже при концентрации 10 мг/л подавляют рост хемоорганотрофных микроорганизмов. Оказалось, для микроорганизмов полигона характерна полирезистентность. В биотопах полигона, таких как мох, озерный ил и почва, широко распространены микроорганизмы, устойчивые к Hg^{2+} , Cd^{2+} и Cr(VI) [Таширев, Матвеева, 2007].

Количество микроорганизмов составляло 10^4 – 10^7 клеток/г образца при сверхвысоких концентрациях металлов: 50 мг/л Hg и 500 мг/л Cd^{2+} и $Cr(VI)$. Таким образом, в антарктическом субполярном оазисе широко распространены микроорганизмы, устойчивые к 4 наиболее токсичным металлам при их концентрациях, на 1-2 порядка превышающих бактерицидные. Отсюда следует, что эта экосистема характеризуется высоким уровнем гомеостаза – устойчивости к металлам как стрессовым факторам (Cu^{2+} , Hg^{2+} , Cd^{2+} и $Cr(VI)$).

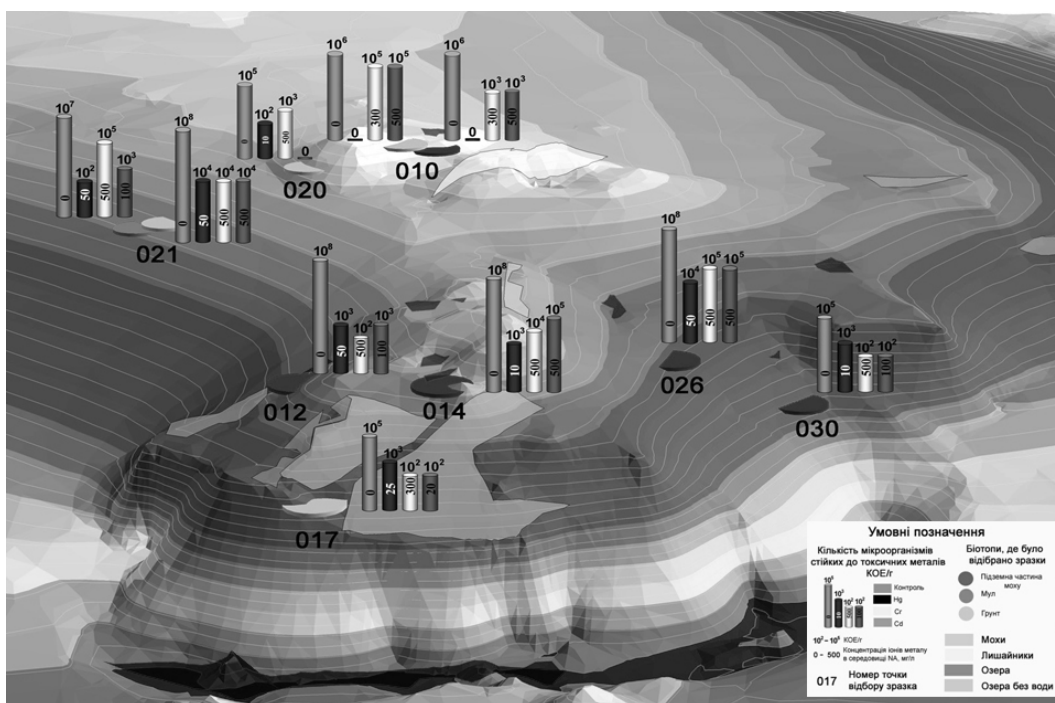


Рис. 8. 3D-модель распределения устойчивых к Hg^{2+} , Cd^{2+} и CrO_4^{2-} микроорганизмов в биотопах полигона (почва, мох, озерный ил).

Для оценки явления устойчивости антарктических микроорганизмов к очень высоким концентрациям ртути, хрома и меди рассмотрим теоретические аспекты взаимодействия микроорганизмов с металлами.

15 лет тому назад нами разработана концепция термодинамического прогнозирования взаимодействия микроорганизмов с металлами [Таширев, Матвеева, 2008]. Центральное положение концепции сводится к тому, что микроорганизмы могут восстанавливать любой металл, если стандартный редокс-потенциал восстановления металла находится в зоне термодинамической устойчивости воды. Верхняя граница устойчивости воды определяется реакцией восстановления O_2 до воды ($E_0' = + 814$ мВ), нижняя – восстановлением протона до водорода ($E_0' = - 414$ мВ). Например, потенциал реакции восстановления хромата находится внутри зоны устойчивости воды и равен + 555 мВ. Поэтому хром(VI) восстанавливается до хрома(III). Дальнейшее микробное восстановление хрома(VI) до хрома(0) невозможно, т.к. потенциал реакции находится за пределами устойчивости воды (– 926 мВ). Правомочность концепции доказана на широком спектре микроорганизмов и металлов. Однако на протяжении 15 лет в концепции оставалось одно «темное пятно». Мы теоретически обосновали, что токсичность любого металла-окислителя пропорциональна концентрации металла и величине его потенциала.

Ртуть, хром и медь образуют ряд токсичности, пропорциональный E_0' . На примере хрома(VI) видно, что его токсичность определяется в первую очередь величиной стандартного потенциала E_0' и очень мало зависит от концентрации металла. Так, при увеличении концентрации Cr(VI) на 8 порядков, от 1×10^{-8} до 1,0 М/л, потенциал возрастает всего лишь на 145 мВ. И при 1 М концентрации хрома(VI) потенциал равен + 555 мВ.

Аналогичные результаты получены для Hg^{2+} и Cu^{2+} . Отсюда мы получили парадоксальное, но совершенно однозначное следствие: если стандартный потенциал реакции восстановления металла находится в зоне редокс-устойчивости воды, то термодинамически допустимо, что некоторые микроорганизмы могут существовать (т.е. расти) при сколь угодно высоких концентрациях металла-окислителя, вплоть до 1 моля/л.

Мы тут же начали выделять такие микроорганизмы из всевозможных природных и техногенных экониш, в том числе из зон экологических катастроф. Однако максимальная устойчивость микроорганизмов к металлам не превышала 50–100 мг/л. И кто бы мог подумать, что через 15 лет, именно в Антарктике, в самом экологически чистом регионе Земного шара, будут обнаружены «теоретически просчитанные», сверхустойчивые к металлам микроорганизмы!

Из почвы полигона выделены неадаптированные к металлам микроорганизмы. Тем не менее они проявили очень высокую устойчивость к хром(VI). 3 штамма росли при почти 1 М концентрации Cr(VI), а 2 – при более высокой – 60 г/л Cr(VI) (рис. 9).

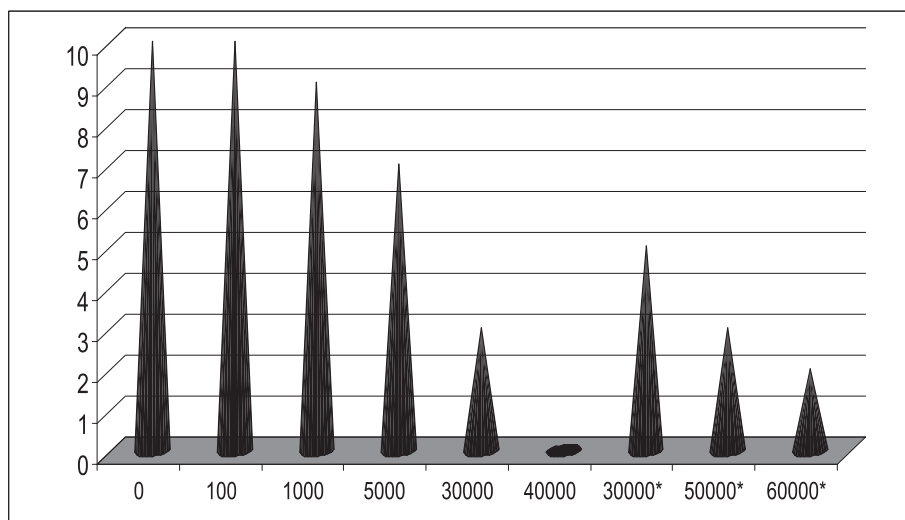


Рис. 9. Антарктические микроорганизмы: сверхустойчивость к хроматам – рост при концентрации 60 000 мг/л Cr(VI), т.е. более 1М/л Cr(VI)

Нам не удалось установить предельно допустимую концентрацию Cr(VI), так как он просто больше не растворялся в среде. Эти же штаммы проявили полирезистентность к сверхвысоким концентрациям 6 самых токсичных металлов. Штаммы способны расти в присутствии 500 мг/л Hg^{2+} , 1000 мг/л Co^{2+} , 2000 мг/л Ni^{2+} , 2500 мг/л Cu^{2+} и 60 000 мг/л Cr(VI) [Таширев, Матвеева, 2007]. Это на несколько порядков выше бактерицидных концентраций металлов для хемоорганотрофных микроорганизмов.

Явление полирезистентности хемоорганотрофных микроорганизмов к наиболее токсичным металлам в концентрационном диапазоне от нескольких граммов в литре и до десятков граммов до сих пор еще никем не было описано.

Мы предположили, что антарктические микробные ценозы принимают «in vivo» активное участие в биогеохимических циклах металлов. Однако для этого необходимо одновременное соблюдение следующих условий:

1. Наличие органических соединений и металлов в биотопах (донорно-акцепторная пара);
2. Высокая концентрация металлрезистентных микроорганизмов в природных биотопах;
3. Устойчивость микроорганизмов к широкому спектру металлов;
4. Способность к взаимодействию микроорганизмов с металлами.

Нами установлены 3 вида взаимодействия антарктических микроорганизмов с металлами:

1. Восстановление и образование нерастворимых соединений:
 - восстановление хромата до гидроксида хрома(III);
 - восстановление железа(III) и осаждение в виде сульфида;
 - восстановление меди(II) до нерастворимой закиси меди.
2. Мобилизация металлов:
 - растворение гидроксида меди микробными метаболитами.
3. Иммобилизация металлов – накопление меди(II) и железа(III) в колониях растущих микроорганизмов.

Отсюда следует, что металлрезистентные микроорганизмы широко распространены в биотопах полигона и играют существенную роль в биогеохимических циклах металлов в Антарктике.

Далее вполне закономерно возникли следующие вопросы по металлрезистентности антарктических микроорганизмов:

1. Почему устойчивость микроорганизмов к металлам в тысячи раз выше, чем их концентрация в биотопах, – уровень адаптации высок или мы имеем дело с ретро-формами микроорганизмов времен неотектонической активности (гидротермальные растворы, насыщенные металлами)?
2. Какой предел устойчивости микроорганизмов к металлам на других островах и на самом континенте – на Антарктическом полуострове?

Нами исследованы металлрезистентные микроорганизмы на 19 объектах в зоне внутреннего островного шельфа размером 30x60 км (рис.10).

Нами исследованы металлрезистентные микроорганизмы на 19 объектах в зоне внутреннего островного шельфа размером 30x60 км (рис.10).

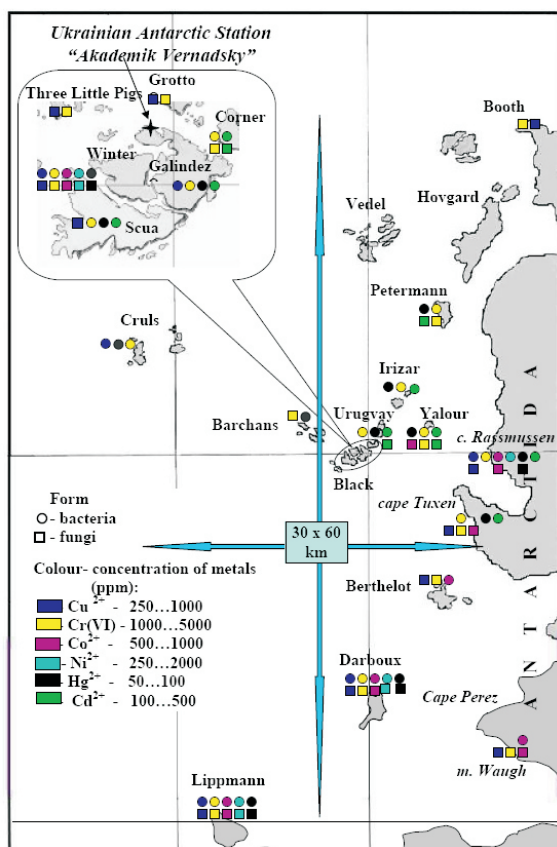


Рис. 10. Скрининг металлрезистентных микроорганизмов (на 19 объектах – островах и мысах побережья Антарктического полуострова).

Результаты:

1. Металлрезистентные микроорганизмы обнаружены на всех 19 объектах.
2. Микроорганизмы растут при высоких предельно допустимых концентрациях 6 самых токсичных металлов (в мг/л): 5000 Cr(VI), 2000 Ni²⁺, 1000 Cu²⁺ и Co²⁺, 500 Cd²⁺ и 100 Hg²⁺.
3. Доказана полирезистентность микробных ценозов.

Выводы:

1. Установленные закономерности по устойчивости антарктических микроорганизмов к металлам являются общими как для полигона на о. Галиндез, так и для 19 объектов в зоне островного шельфа.

2. Устойчивость к металлам микробных ценозов – распространенное явление на внутреннем островном шельфе Антарктического полуострова.

3. Антарктические биотопы являются стабильным источником штаммов для создания новых универсальных биотехнологий очистки металлсодержащих сточных вод и повышения добычи цветных или драгоценных металлов.

Металлрезистентные микроорганизмы широко распространены в биотопах внутреннего островного шельфа, таких как почва, мох, лишайники, гумус и озерный ил (рис. 11).

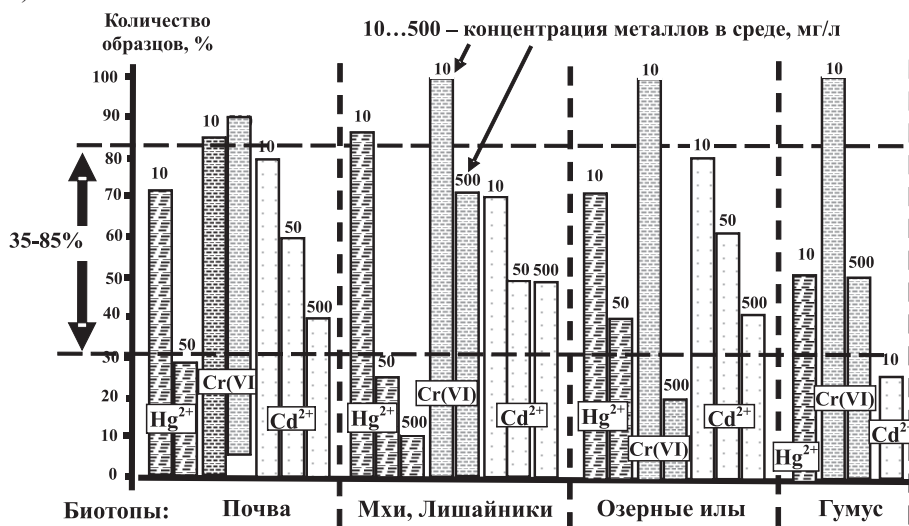


Рис. 11. Широкое распространение металлрезистентных микроорганизмов в типовых биотопах внутреннего островного шельфа.

Исследовано более 200 образцов на наличие микроорганизмов, устойчивых к Hg²⁺, Cr(VI) и Cd²⁺. Показано, что от 35 до 85% образцов содержат микроорганизмы, устойчивые к «бактерицидным» концентрациям этих металлов [Таширев А.Б., Романовская В.А., 2008]. Полученные по структуре и функциям антарктических микробных ценозов данные позволили сделать следующие выводы:

1. Ценозы диверсифицированы по физиологическим и эколого-трофическим группам.
2. Они проявляют высокий уровень адаптации и устойчивости к металлам как экстремальным факторам.
3. Ценозы исследованных биотопов сходны между собой по структуре и функциям.

На этом основан ход дальнейших исследований, а именно:

1. Локальные микробные ценозы субполярных оазисов являются репрезентативными индикаторными экосистемами, отражающими реакцию всей субполярной биоты на действие экстремальных факторов (в т.ч. и климатических).

2. Устойчивость ценозов к металлам предполагает возможную устойчивость к комплексу других экстремальных факторов – УФ-радиации, антибиотикам и т.д.

3. Индикаторная микробная экосистема должна быть компактной (малая площадь) и максимально открытой для действия комплекса экстремальных факторов.

По этим критериям наиболее подходят две экосистемы: 1 – микробные ценозы вертикальных скал, и 2 – микробные ценозы ледников. На полигоне позиционированы два скалодрома высотой 10–15 м. Это настоящие «вертикальные оазисы». Скалы круглый год открыты для УФ-радиации и укрыты мощным биологическим слоем. Неравномерное распределение органики стимулирует конкуренцию микроорганизмов за субстрат, отсюда – синтез антибиотиков. Наконец, микроорганизмы выщелачивают из пород токсичные металлы. В наскальных образцах частота встречаемости пигментированных форм, их общее количество, а также биоразнообразие значительно выше, чем в других биотопах полигона. Из образцов выделены бактерии, дрожжи и микромицеты, окрашенные в черный, коричневый, красный, розовый и желтый цвета. В среднем количество пигментированных микроорганизмов находится в пределах 10^4 – 10^6 кл./г образца, но иногда достигает даже 10^7 .

Очевидно, что пигментированные микроорганизмы скальных биотопов являются потенциальными продуцентами биологически активных веществ, таких как меланины, каротины, флавины и др. Из типовых штаммов создана коллекция хемоорганотрофных микроорганизмов скальных биотопов. 10 штаммов исследованы на устойчивость к УФ-радиации и токсичным металлам. Непигментированные формы чувствительны к действию УФ – для них сублетальная доза ($LD_{99,99}$) составляла 40 Дж/м². Пигментированные формы, как и предполагалось, в десятки раз более устойчивы к УФ. Для розовых *Methylobacterium* $LD_{99,99}$ = 300, а для красных и черных дрожжей – 1500 Дж/м² [Романовская, Шилин, 2005].

Типовые штаммы, выделенные на среде без металлов, проявили высокий уровень устойчивости к 5 металлам. В ряду устойчивости указаны максимальные концентрации металлов, при которых возможен рост микроорганизмов (рис. 12).

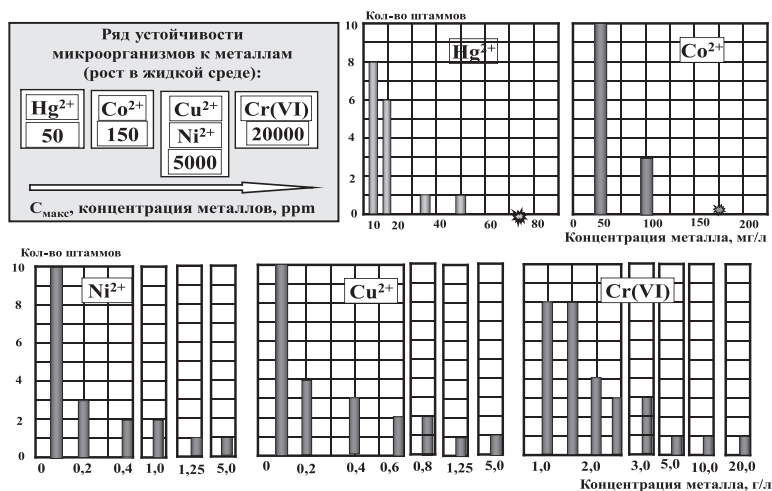


Рис. 12. Количественные показатели множественной устойчивости микроорганизмов к металлам (Скалодром-2).

Таширев А.Б.: КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ФУНКЦИЙ АНТАРКТИЧЕСКИХ НАЗЕМ...

Получены следующие значения концентраций: Hg^{2+} – 50 мг/л, Co^{2+} – 150, Ni^{2+} и Cu^{2+} – 1250, Cr(VI) – 10 000 мг/л. Несмотря на высокую устойчивость к металлам, повышение концентрации металлов закономерно приводит к снижению количества выросших штаммов [Таширев А.Б., Романовская В.А., 2008]. Однако для трех металлов – Ni^{2+} , Cu^{2+} и Cr(VI) предельные концентрации пока что не установлены, это дело ближайшего будущего.

Неравномерное распределение органики в биотопах приводит к конкуренции микроорганизмов за субстрат и далее – к антибиозу. Антибиоз проявляется как в синтезе антибиотиков микроорганизмами, так и в устойчивости к этим антибиотикам. Из антарктических биотопов выделена культура *Pseudomonas putida* [Жоцофляк, 2004], подавляющая рост условно-патогенных микроорганизмов. Интересно отметить, что при оптимальной температуре роста (+26 °C) антибиотическая активность была минимальной, а при неблагоприятной (+4 °C) – активность резко возросла. Две антарктические культуры *Enterobacter hormachii* и *Brevibacterium antarcticum* проявили устойчивость к 9 антибиотикам широкого спектра действия. Они вызывают повреждение цитоплазматической мембраны и подавление синтеза белка. Исследования синтеза антибиотиков и устойчивости к ним антарктических микроорганизмов начаты совсем недавно, однако первые полученные данные свидетельствуют о существовании антибиоза в антарктических биотопах.

Второй индикаторной экосистемой являются микробные ценозы ледников. Во время полярного лета на поверхности ледников активно развиваются двухкомпонентные ценозы, состоящие из фотосинтетических и хемоорганотрофных микроорганизмов. Фотосинтезирующие микроорганизмы фиксируют N_2 и парниковый газ – CO_2 , а также продуцируют органические соединения (биомасса фотосинтетиков). Гетеротрофные микроорганизмы разлагают биомассу фотосинтетиков до биогумуса и при этом синтезируют парниковые газы – CH_4 и CO_2 . Биогумус образует на ледниках стабильные векторные потоки углерода. Таким образом, на громадных территориях субполярной Антарктики происходят глобальные процессы трансформации соединений углерода и азота.

Кроме того очевидно, что ледовые микроорганизмы на поверхности снега и льда реагируют на атмосферные и другие климатические изменения. Следовательно, микробные ценозы ледников представляют собой индикаторные экосистемы и могут быть эффективно использованы:

- для оценки влияния глобальных климатических факторов на антарктические экосистемы;
- для изучения закономерностей образования и транспорта органических соединений и оценки баланса парниковых газов в субполярной Антарктике.

Нами разработаны природоохранные биотехнологии по переработке твердых пищевых отходов и очистке сточных вод для станции Академик Вернадский. Технологии основаны на способности антарктических микроорганизмов адаптироваться к неблагоприятным условиям среды и чужеродным органическим соединениям, в т.ч. и к указанным антропогенным отходам. Технология переработки пищевых отходов внедрена на станции еще в 2004 г., а технология по очистке сточной воды подготовлена к внедрению. Эти технологии являются универсальными и могут использоваться в мегаполисах для эффективного решения стратегической задачи – утилизации органических отходов свалок и очистки токсичного фильтрата до состояния «экологически чистая вода».

В настоящее время активно дискутируется проблема соотношения фундаментальных и прикладных исследований в Антарктике – чему отдать предпочтение? Каково же единственно верное решение? На этот вопрос ответил Фрэнсис Бэкон еще в 1620 г.: «Не существует теоретических и прикладных наук, но есть только приложение науки к практике!».

Отсюда очевидно, что единственно верный методологический поход – это изучение явления, и лишь затем – его практическое применение в соответствии с установленными свойствами.

И для подтверждения приведем только один пример из наших исследований в Антарктике (рис. 13).



Рис. 13. Связь фундаментальных и прикладных антарктических исследований.

При изучении структуры и функций микробных ценозов исследовали влияние экстремальных факторов, в т.ч. УФ-радиации. Затем провели скрининг пигментированных форм микроорганизмов и создали коллекцию пигментированных штаммов. Среди выделенных штаммов особый интерес представляют черные дрожжи *Nadsoniella nigra* (Т.В. Береговая). Изучение свойств *N. nigra* показало устойчивость этой культуры к широкому спектру токсичных металлов и способность к их эффективной аккумуляции. Кроме того, *N. nigra* является продуцентом весьма эффективных противоязвенных и противораковых соединений. Таким образом, практическое использование свойств только одной этой культуры приведет к созданию новых биотехнологий извлечения токсичных металлов и внедрению новых лечебных препаратов.

Исходя из изложенного, нами сформулированы следующие стратегические перспективы микробиологических исследований в Антарктике (рис. 14).



Рис. 14. Стратегические перспективы микробиологических исследований в Антарктике.

Исследования планируются на трех уровнях:

1. Микроорганизмы

2. Явления

3. Процессы

На уровне микроорганизмов изучаются физиологические, эколого-трофические и др. группы, создаются коллекции штаммов.

На уровне явлений изучается закономерности гомеостаза микробных ценозов при действии комплекса стрессовых факторов.

На уровне процессов изучается роль микробной биоты в глобальных биогеохимических и климатических процессах.

Практическое применение полученной экспериментальной базы данных по изучению антарктических микробных ценозов сводится к следующей последовательности действий:

Микроорганизмы: создаются коллекции штаммов – продуцентов биологически активных веществ (БАВ)

Явления: создаются природоохранные биотехнологии и биотехнологии получения БАВ

Процессы: создаются модели прогнозирования биогеохимических и климатических процессов.

Выражение благодарности. Проведение системного изучения антарктической микробной биоты было бы невозможным без финансовой, логистической и организационной поддержки Национального антарктического научного центра Министерства образования и науки Украины. Неоценимую помощь оказали директор Центра В.А. Литвинов и научный директор академик НАН Украины П.Ф. Гожик, а также научные сотрудники отдела биологии НАНЦ. Директор Института микробиологии и вирусологии НАН Украины академик В.С. Подгорский создал все необходимые условия для эффективной работы в области исследования антарктических микроорганизмов. Особую благодарность необходимо выразить чл.-кор. НАН Украины Е.И. Андреюк, чл.-кор. НАН Украины Г.А. Иутинской, проф. Т.В. Береговой, к.г.н. В.П. Усенко, проф. В.А. Романовской и всем сотрудникам Отдела биологии экстремофильных микроорганизмов ИМВ НАН Украины за участие в проведении исследований. Создание геобазы данных и 3D-моделей полигона проводилось при поддержке фирмы ЕСОММ (Е.С. Серединин и Д.А. Мизин), а также В.П. Усенко. Наконец, в крайне экстремальных условиях антарктических экспедиций отбор образцов для научных исследований на протяжении ряда лет состоялся благодаря самоотверженной работе полярников-зимовщиков и участников сезонных научных экспедиций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коцофляк О.І., Рева О.М., Таширев О.Б. Таксономічний склад та антагоністичні властивості антарктичних флуоресціюючих бактерій роду *Pseudomonas* // Мікробіол. журнал. – 2004. – 66, № 2. – С. 3–10.

2. Романовская В.А., Шилин С.О., Черная Н.А., Таширев А.Б., Рокитко П.В., Малашенко Ю.Р. Поиск психрофильных метилотрофных бактерий в экстремальных биотопах Антарктики // Мікробіол. журнал. – 2005. – 67, № 3. С. 3–11.

3. Таширев О.Б., Таширева Г.О., Войцицкий В.М. Характеристика микробных ценозов антарктических грунто-субстратов. // Вісник КНУ імені Тараса Шевченка, № 43, с. 107–109.

4. Таширев А.Б., Матвеева Н.А., Романовская В.А., Таширева А.А., Рокитко П.В. Полирезистентность и сверхустойчивость к тяжёлым металлам антарктических микроорганизмов // Доповіді Національної Академії наук України. – 2007. – № 11. – С. 70–75.

Таширев А.Б.: КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ФУНКЦИЙ АНТАРКТИЧЕСКИХ НАЗЕМ...

5. **Таширев А.Б., Романовская В.А., Сиома И.А.,** Усенко В.П., Таширева А.А., Матвеева Н.А., Рокитко П.В., Копытов Ю.П., Серединин Е.С., Мизин Д.А., Подгорский В.С. Антарктические микроорганизмы, устойчивые к высоким концентрациям Hg^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} и CrO_4^{2-} // Доповіді НАН України. – 2008. – № 1. – С. 169–176.

6. **Таширев А.Б., Матвеева Н.А., Таширева А.А.,** Романовская В.А. Экспериментальное обоснование термодинамического прогнозирования редокс-взаимодействия микроорганизмов с металлами-окислителями (Hg^{2+} , CrO_4^{2-} и Cu^{2+}) // Доповіді НАН України. – 2008. – № 4. – С. 166–172.

7. **Matveeva N., Tashyreva G., Tashyrev O.** Cooper-resistant microorganisms isolated from Antarctic island Galindez // Український антарктичний журнал – 2006, № 4-5, – С. 232–234.

8. **Tashyreva G., Matveeva N., Tashyrev O.** Occurrence of Cu^{2+} -resistant microorganisms on Antarctic island Galindez // Український антарктичний журнал – 2006, № 4-5. – С. 219–222.