

УТВЕРЖДАЮ

и.о. директора

Федерального государственного учреждения

«Федеральный исследовательский центр

«Фундаментальные основы биотехнологии»

Российской академии наук»

д. б. н. А. Н. Федоров



15.06.2023

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из протокола совместного заседания лабораторий Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук»: отдела биологии экстремофильных микроорганизмов, лаборатории реликтовых микробных сообществ, лаборатории молекулярной экологии и филогеномики бактерий, лаборатории экологии и геохимической деятельности микроорганизмов.

Диссертация «Трансформация минералов железа анаэробными бактериями содовых озер» выполнена Дарьей Георгиевной Заварзиной в лаборатории реликтовых микробных сообществ и в лаборатории метаболизма экстремофильных прокариот ФИЦ Биотехнологии РАН. Научный консультант – д. б. н., чл.-корр. РАН Е. А. Бонч-Осмоловская (зав. отделом биологии экстремофильных микроорганизмов).

Д. Г. Заварзина в 1997 году окончила Геологический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по специальности «Геохимия» и поступила в очную аспирантуру. Окончила аспирантуру на кафедре геохимии Геологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в 2000 году. С 1998 по 2000 гг. работала на 0.5 ставки м.н.с. в лаборатории экспериментальной геохимии

Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. С 2000 по 2005 г. работала в этой же лаборатории на должности младшего научного сотрудника, а затем научного сотрудника.

Поступила на работу в Институт микробиологии им. С. Н. Виноградского РАН в 2005 г., в настоящий момент является старшим научным сотрудником лаборатории метаболизма экстремофильных прокариот Института микробиологии им. С. Н. Виноградского ФИЦ Биотехнологии РАН.

В 2001 году Заварзиной Д.Г. присуждена ученая степень кандидата геолого-минералогических наук по результатам защиты кандидатской диссертации на тему «Биогеохимические факторы преобразования соединений железа в восстановительной обстановке» по специальности 25.00.09. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

### **Слушали:**

доклад по диссертации с. н. с. Заварзиной Дарьи Георгиевны на соискание ученой степени доктора биологических наук «Трансформация минералов железа анаэробными бактериями содовых озер».

### **Рецензенты:**

зав. лаб., д. б. н. А. С. Саввичев, зав. лаб., д. б. н. Т. Н. Назина, г. н. с., д. б. н. В. М. Горленко.

### **Вопросы задавали:**

зам. дир., д. б. н. Н. В. Пименов, с. н. с., к. б. н. С. Н. Гаврилов, зав. лаб., д. б. н. А. В. Летаров, м. н. с. М. А. Летарова, зав. лаб., д. б. н. Т. Н. Назина, с. н. с., к. б. н. Н. А. Черных, с. н. с., к. б. н. А. В. Лебединский, м. н. с. А. И. Карасева.

### **В дискуссии приняли участие:**

зав. лаб., д. б. н. С. Н. Дедыш, зам. дир., д. б. н. Н. В. Пименов, с. н. с., к. б. н. С. Н. Гаврилов, с. н. с., к. б. н. Т. В. Кочеткова, с. н. с., к. б. н. О. С. Самылина, зав. лаб., г. н. с., д. б. н. Т. В. Хижняк, с. н. с., д. б. н. Т. Г. Соколова, зав. отд., д. б. н. Е. А. Бонч-Осмоловская.

### **По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

Диссертационная работа Д. Г. Заварзиной представляет собой завершенное целостное научное исследование, выполненное на современном методическом уровне и посвященное изучению биоразнообразия алкалофильных анаэробных прокариот и их участия в трансформации минералов железа.

## **Актуальность проблемы**

Важнейшим этапом становления биосферы, в ходе которого были сформированы основные биогеохимические циклы, является криптозой, составляющий  $\frac{3}{4}$  геологической истории Земли. В этот период осуществление основных превращений с участием переменновалентных элементов, прежде всего углерода и железа, осуществляли прокариоты. В этот же период происходил масштабный процесс образования осадочных железисто-кремнистых формаций, составляющих около 60% мировых запасов железных руд, что не могло не отразиться на протекающих в это время процессах с участием микроорганизмов. Парадоксально высокая средняя степень окисления  $Fe^{2.4+}$  в минералах железисто-кремнистых формаций заставляет искать эффективный способ окисления двухвалентного железа условиях бескислородной атмосферы. Открытые в конце прошлого века процессы диссимиляционной железоредукции и анаэробного фото- и нитрат-зависимого окисления железа позволили геологам рассматривать биогенный фактор как один из ведущих в формировании минерального парагенезиса железистых кварцитов. Огромные количества железа, сконцентрированные в этих формациях, являются следствием двух основных процессов - подводной вулканической деятельности и выветривания, поэтому при рассмотрении процессов микробной трансформации железа в этот период следует учитывать не только процессы, происходившие в океане, но и на поверхности континентов.

Конечным результатом углекислотного выветривания - ведущего фактора преобразования магматических горных пород в осадочные на поверхности Земли является формирование содовых озер. Образование сильнощелочных вод в архее могло носить глобальный характер, что предполагает существование на континентах обширных содовых водоемов. В этом случае, в условиях доминирования биогеохимического цикла железа, большую роль в трансформации минералов железа и деградации органического вещества должны были играть алкалофильные микроорганизмы, получающие энергию за счет окисления/восстановления железа.

Интенсивные исследования анаэробных микробных сообществ современных содовых озер выявили их функциональное и фенотипическое разнообразие, автономность и почти



полную замкнутость основных биогеохимических циклов, а также ведущую роль сульфидогенов на заключительных этапах разложения органического вещества. Возможность развития алкалофильных микроорганизмов, осуществляющих окисление/восстановление железа, фактически оставалось вне рамок систематических исследований.

Таким образом в контексте фундаментальных вопросов, связанных с протяженным этапом развития геосферы и биосферы Земли, во время которого доминировал биогеохимический цикл железа и осуществлялось массовое отложение осадочных железных руд, восполнение существующих пробелов знаний относительно микробной трансформации минералов железа в анаэробных щелочных условиях представляется важным и актуальным.

## Научная новизна

Описаны и узаконены 7 новых таксонов (в том числе 3 новых рода) алкалофильных анаэробных бактерий.

Доказана способность к прямому восстановлению нерастворимых соединений железа у известных видов алкалофильных литотрофных сульфидогенов.

Показана способность анаэробных бактерий, относящихся к родам *Geoalkalibacter* и *Dethiobacter*, осуществлять как восстановление, так и окисление железа, входящего в состав карбонатов, оксидов, гидроксидов и силикатов.

Продемонстрирована возможность существования синтрофной культуры, развивающейся за счет трансформации минералов железа и окисления этанола, межвидовое взаимодействие в которой обусловлено в основном механизмом прямого переноса электронов через магнетит.

Впервые продемонстрирована возможность анаэробной микробно-индуцированной коррозии стали в карбонатной среде при  $\text{pH} \geq 9.0$ .

Продемонстрирована возможность существования алкалофильного микробного сообщества, в основе развития которого лежит процесс аноксигенного фотозависимого окисления минералов железа, осуществляемый пурпурной бактерией *Ectothiorodospira shaposhnikovii*.

Показано, что процесс анаэробного окисления сидерита в отсутствие света и нитратов может осуществляться не только алкалофильными, но и термофильными бактериями,

осуществляющими его циклическую трансформацию, в которой ацетат и магнетит являются промежуточными продуктами-медиаторами.

## Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты представленной работы дают новую информацию о биологическом разнообразии алкалофильных анаэробных прокариот – их филогении и таксономии, физиологии и метаболизме. Они восполняют имевшийся пробел в знаниях о функциональной группе алкалофильных диссимиляционных железоредукторов.

Обнаружение возможности анаэробного диссимиляционного окисления железа в отсутствии света и нитратов и выделение бактерий, осуществляющих его, расширяет представления о функционировании биогеохимического цикла железа в анаэробных условиях. Полученные данные о взаимодействии бактерий в комбинированных культурах, основанных на метабиотических и синтрофных взаимодействиях, позволяют по-новому взглянуть на трофические взаимодействия в анаэробных микробных сообществах и связи биогеохимических циклов углерода и железа. Экспериментально продемонстрированные возможности существования автономных алкалофильных и термофильных микробных сообществ, развивающихся в автотрофных условиях с восстановленными минералами железа в качестве источников энергии, важны для понимания процессов, протекавших на ранних этапах развития биосферы Земли. Доказательство осуществления ими циклической трансформации сидерита дает ключ к пониманию функционирования биогеохимического цикла железа в Архее-Протерозое.

Практическая значимость работы заключается, прежде всего, в создании коллекции штаммов алкалофильных анаэробных железоредуцирующих и железooksисляющих прокариот. Новые изоляты представлены как органотрофами, так и литоавтотрофами, способными к восстановлению и окислению железа, серы и ее соединений. Полученные штаммы могут служить объектами для исследования путей их энергетического и конструктивного метаболизма с привлечением данных полногеномного секвенирования, транскриптомики и протеомики. Непосредственное биотехнологическое применение может найти *Geoalkalibacter ferrihydriticus*, являющийся электрогеном. Изучение процесса микробно-индуцированной коррозии стали в восстановительных щелочных средах позволит выработать адекватные и эффективные меры борьбы с этим явлением.

## Апробация работы

Материалы исследований по теме диссертации были представлены в виде стендовых и устных докладов на российских и международных конференциях.

Соискатель имеет 21 экспериментальную статью по теме диссертации.

### Основные публикации:

1. Жилина Т.Н., **Заварзина Д.Г.**, Колганова Т.В., Турова Т.П., Заварзин Г.А. (2005). *Candidatus "Contubernalis alkalaceticum"* – облигатно синтрофная алкалофильная бактерия, анаэробно окисляющая ацетат в бинарной культуре с *Desulfonatotum cooperativum* // Микробиология. Т. 74. С. 800-809.
2. **Заварзина Д.Г.**, Колганова Т.В., Булыгина Е.С., Кострикина Н.А., Турова Т.П., Заварзин Г.А. (2006). *Geoalkalibacter ferrihydriticus* gen.nov., sp. nov., первый алкалофильный представитель семейства *Geobacteraceae*, выделенный из содового озера // Микробиология. Т. 76. С. 775-785.
3. Zhilina T.N., **Zavarzina D.G.**, Panteleeva A.N., Osipov G.A., Kostrikina N.A., Tourova T.P., Zavarzin G.A. (2012). *Fuchsiella alkaliacetigena* gen. nov., sp. nov., an alkaliphilic, lithoautotrophic homoacetogen from a soda lake // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. Vol. 62. P. 1666-1673.
4. **Заварзина Д.Г.**, Кевбрин В.В., Т.Н. Жилина, Чистякова Н.И., Шапкин А.В., Заварзин Г.А. (2011). Восстановление синтезированного ферригидрита бинарной анаэробной культурой *Anaerobacillus alkalilacustris* и *Geoalkalibacter ferrihydriticus* при росте на манните, pH 9.5. // Микробиология. Т. 80. С. 731-746.
5. **Zavarzina D.G.**, Chistyakova N.I., Shapkin A.V., Savenko A.V., Zhilina T.N., Kevbrin V.V., Alekseeva T.V., Mardanov A.V., Gavrillov S.N., Bychkov A.Yu. (2016). Oxidative biotransformation of biotite and glauconite by alkaliphilic anaerobes: The effect of Fe oxidation on the weathering of phyllosilicates // Chem. Geol. Vol. 439. P. 98–109.
6. **Заварзина Д. Г.**, Гаврилов С. Н., Жилина Т. Н. (2018). Прямое восстановление Fe(III) из синтезированного ферригидрита галоалкалофильными литотрофными сульфидогенами // Микробиология. Т. 87. С.114–124.
7. **Zavarzina D.G.**, Kochetkova T. V., Chistyakova N.I., Gracheva M. A., Antonova A. V., Merkel A. Yu., Perevalova A. A., Chernov M. C., Koksharov Yu. A., Bonch-Osmolovskaya E. A., Gavrillov S. N., Bychkov A. Yu. (2020). Siderite-based anaerobic iron cycle driven by autotrophic thermophilic microbial consortium // Sci. Rep. 10.21661.
8. **Zavarzina D.G.**, Gavrillov S.N., Chistyakova N.I., Antonova A.V., Gracheva M.A., Merkel A.Y., Perevalova A.A., Chernov M.S., Zhilina T.N., Bychkov A.Y., Bonch-Osmolovskaya E.A. (2020). Syntrophic growth of alkaliphilic anaerobes controlled by ferric and ferrous minerals transformation coupled to acetogenesis // ISME J. Vol. 14(2). P. 425-436.
9. **Zavarzina D.G.**, Zhilina T.N., Kostrikina N.A., Toshchakov S.V., Kublanov I.V. (2020). *Isachenkonina alkalipeptolytica* gen. nov. sp. nov., a new anaerobic, alkaliphilic proteolytic bacterium capable of reducing Fe(III) and sulfur // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. Vol. 70. P. 4730-4738.
10. **Zavarzina D. G.**, Merkel A. Yu., Klyukina A. A., Elizarov I. M., Pikhtereva V. A., Rusakov V. S., Chistyakova N. I., Ziganshin R. H., Maslov A. A., Gavrillov S. N. (2023). Iron or sulfur respiration – an adaptive choice determining the fitness of a natronophilic bacterium *Dethiobacter alkaliphilus* in geochemically contrasting environments // Front. Microbiol. DOI:10.3389/fmicb.2023.1108245.



В результате обсуждения участники совместного заседания пришли к выводу о том, что диссертация Д. Г. Заварзиной «Трансформация минералов железа анаэробными бактериями содовых озер» отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора биологических наук по специальности 1.5.11 Микробиология. Заключение принято на совместном заседании отдела биологии экстремофильных микроорганизмов, лаборатории реликтовых микробных сообществ, лаборатории молекулярной экологии и филогеномики бактерий, лаборатории экологии и геохимической деятельности микроорганизмов.

### **Рекомендовали:**

Отредактировать защищаемые положения и выводы, существенно переработать доклад и презентацию.

Присутствовало на заседании 51 человек. Результаты голосования: «за» - 51, «против» - 0, «воздержалось» - 0. Протокол №6 от 8 июня 2023 года.

### **Присутствовали:**

Зам. дир., д. б. н. Н. В. Пименов, н. с., к. б. н. Ю. Ю. Берестовская, н. с., к. б. н. Ю. В. Болтянская, н. с., к. б. н. Т. А. Канапацкий, с. н. с., к. б. н. О. С. Самылина, асп. А. В. Пелевина, с. н. с., к. б. н. Е. Н. Деткова, с. н. с., к. б. н. В. В. Кевбрин, с. н. с., к. б. н. С. Э. Белова, м. н. с. К. К. Мирошников, зав. лаб., г. н. с., д. б. н. Т. В. Хижняк, с. н. с., к. б. н. Е. Н. Фролов, м. н. с. А. И. Карасева, с. н. с., к. б. н. О. А. Подосокорская, с. н. с., к. б. н. Т. В. Кочеткова, с. н. с. к. б. н. А. Ю. Каллистова, с. н. с., д. б. н. Т. Г. Соколова, м. н. с. А. И. Мальцева, зам. уч. секр., д. б. н. И. С. Мысякина, с. н. с., к. б. н. Н. А. Черных, с. н. с., к. б. н. А. В. Лебединский, н. с., к. б. н. М. А. Хомякова, с. н. с., к. б. н. А. Ю. Меркель, в. н. с., д. б. н. Г. Б. Слободкина, зав. лаб., д. б. н. А. И. Слободкин, асп. А. П. Захарычева, г. н. с., д. б. н. Т. Н. Жилина, зав. лаб., д. б. н. С. Н. Дедыш, зав. отд., д. б. н. Е. А. Бонч-Осмоловская, д. х. н. К. А. Мирошников, зав. лаб., д. б. н. А. С. Саввичев, зав. лаб., д. б. н. А. В. Летаров, к. б. н. О. В. Данилова, студ. В. А. Пихтерева, к. х. н. А. Р. Строева, м. н. с. А. И. Насянова, с. н. с., д. б. н. А. А. Клюкина, н. с., к. б. н. А. Г. Ельченинов, н. с., к. б. н. К. С. Заюлина, м. н. с. М. А. Летарова, м. н. с. В. А. Салтыкова, м. н. с. Р. З. Сулейманов, м. н. с. А. В. Гололобова, н. с., к. б. н. М. И. Прокофьева, н. с., к. б. н. И. А. Брянцева, с. н. с., к. б. н. С. Н. Паршина,

зав. лаб., д. б. н. Т. Н. Назина, с. н. с., к. б. н. Д. Г. Наумов, в. н. с., д. б. н. Т. П. Турова,  
зав. лаб., д. б. н. Д. А. Складнев, с. н. с., к. б. н. С. Н. Гаврилов.

Рецензенты

зав. лаб., д. б. н.  А. С. Саввичев

зав. лаб., д. б. н.  Т. Н. Назина

г.н.с., д. б. н.  В. М. Горленко

Секретарь заседания

с.н.с., к.б.н.  Т.В. Кочеткова

Председатель заседания

зам. дир., д. б. н.  Н. В. Пименов

Дата:

08.06.2023