

## ЖЕЛЕЗОРЕДУЦИРУЮЩИЕ МИКРООРГАНИЗМЫ В СВЕРХГЛУБОКИХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОДАХ

**Впервые в породах Уральской сверхглубокой скважины (СГ-4) изучены железоредуцирующие бактерии (ЖРБ) наряду с микроорганизмами циклов серы и углерода. Показано широкое распространение ЖРБ и их возможное участие в биогенном образовании магнитных минералов, среди которых в породах СГ-4 чаще встречается магнетит. Подтверждено постоянное присутствие сульфатредуцирующих бактерий, открыты тионовые бактерии.**

**Ключевые слова:** сверхглубокие скважины, породы, магнитные свойства железоредуцирующие бактерии, цикл серы, гетеротрофные микроорганизмы.

Сульфатредуцирующие бактерии (СРБ) являются той группой микроорганизмов, благодаря которой было обращено внимание на биологические процессы в подземной среде в конце 20-х гг. прошлого века. С тех пор на них постоянно обращают внимание при исследовании так называемой «подземной биосферы». Железоредуцирующие бактерии (ЖРБ) гораздо реже вызывают интерес, хотя часто находятся в конкурентных отношениях с СРБ и могут влиять на физико-химические свойства подземных вод и пород. Так в подземных водах вулканического происхождения Финляндии и Швеции в интервале глубин 68 – 1240 м были обнаружены как сульфат-, так и железоредуцирующие микроорганизмы в концентрации  $10^0$  –  $10^4$  кл/мл, соотношение между которыми в разных горизонтах имело обратно пропорциональную зависимость [1]. На примере кристаллических пород, вскрытых Воротиловской глубокой научной скважиной (ВГС), была показана потенциальная способность ЖРБ к биогенезу магнитных минералов, которые придавали породам повышенный магнетизм [2].

Цель настоящей работы – выявить железовосстанавливающие и сопутствующие микроорганизмы циклов серы и углерода в туффитах, вскрытых Уральской сверхглубокой скважиной (СГ-4) в связи с закономерным повышением намагниченности насыщения этих вулканических пород в интервале глубин от 1559 до 4125 м.

Объектом исследования служил обломочный материал туффитов, изъятый из разреза СГ-4 с глубин 1559, 3976 и 4125 м и предоставленный ФГУП НПЦ «Недра» (Ярославль). Перед микробиологическим анализом поверхность проб пород стерилизовали и растирали до порошкообразного состояния по ранее разработанной методике [2]. Накопительные культуры ЖРБ выращивали на среде Лавли со свежесажженным гидроксидом Fe(III) в качестве источника железа и разными источниками углерода (ацетатом или лактатом) в

анаэробных условиях (под резиновыми пробками) при 60°C в течение четырех недель [3]. О росте микроорганизмов судили по помутнению среды. Протекание железоредукции регистрировали по появлению розового окрашивания в реакции с ортофенантролином [4]. В сопутствующий микробный комплекс были включены микроорганизмы цикла серы, среди которых особое внимание было обращено на сульфатредукторов как конкурентов железовосстанавливающих микроорганизмов, а также гетеротрофные бактерии для подтверждения наличия доступного для микроорганизмов органического вещества и возможности протекания биологических процессов *in situ*. Для изолирования микроорганизмов в соответствии с представлениями о гидробиохимической зональности подземной среды [5] в смешанной зоне (1559 м) были выбраны тионовые и аэробные гетеротрофные бактерии с окислительным типом метаболизма, а в анаэробной зоне (3976, 4125 м) – гетеротрофы, осуществляющие брожение, сульфатредуцирующие (СРБ) и железоредуцирующие (ЖРБ) бактерии. Численности микроорганизмов соответствующих физиологических групп оценивали методом определения наиболее вероятного числа по результатам посева на стандартные селективные среды из десятикратных предельных разведений [6]. Сопряженность процессов восстановления железа и биогенеза магнитоупорядоченных соединений оценивали на основании сравнения магнетизма пород и биоосадка накопительных культур ЖРБ. Для этого сконцентрированный на дне пробирок осадок, включающий микроорганизмы, отделяли и высушивали при комнатной температуре. Намагниченность насыщения ( $s_{\text{нас}}$ ) определяли на магнитных весах методом Фарадея [7].

Результаты оценки численности микроорганизмов соответствующих физиологических групп (таблица 1) подтверждают существование гидробиохимической зональности по стволу СГ-4 осо-

бенно наглядно в случае распределения анаэробных гетеротрофов. Численность аэробных гетеротрофных бактерий ( $10^3$  кл/г породы) находится в пределах той, которая ранее была обнаружена в породах вулканического происхождения (туфах), изъятых с глубины 400 м в штате Невада США ( $10^2 - 10^5$  КОЕ/г породы) [8].

Одновременное присутствие тионовых и сульфатредуцирующих бактерий подтверждает наличие смешанных условий в разрезе СГ-4 на глубине 1559 м.

Тионовые бактерии в этих породах обнаружены впервые. По данным Оборина и др. [9], в туффитах иных интервалов глубин (3621 – 3626, 4438 – 4503, 4986 – 4992 и 5088 – 5094 м) разреза Уральской сверхглубокой скважины СРБ и метаногены являются наиболее постоянными членами микробиоты, которые мирно сосуществуют друг с другом. Исключение составляет горизонт 4467 – 4503 м, где конкуренцию за водород выигрывают метанобразующие и водородокисляющие микроорганизмы. Определенная нами (таблица 1) численность СРБ ( $10^0 - 10^2$  кл/г породы) согласуется с установленной ранее ( $0 - 10^2$  кл/г породы), а ее уменьшение на глубинах 3976 и 4125 м соответствует пониженной численности СРБ ( $10^1$  кл/г породы) в близлежащем слое 4439 м [9]. В изученных нами горизонтах (табл. 1) ЖРБ наиболее обильны на глубинах 1559 и 4125 м, где их численность максимальна и достигает  $10^2$  кл/г породы.

Определение магнитных свойств туффитов (таблица 2) показывает, что их намагниченность насыщения  $s_{нас}$  ( $r10^{-3}$  ГсЧсм<sup>3</sup>/г) возрастает с увеличением глубины залегания породы на 2 по-

рядка. На отметке 4125 м ее значение  $2268r10^{-3}$  ГсЧсм<sup>3</sup>/г соизмеримо с аналогичным показателем кристаллических пород, вскрытых ВГС на глубинах 2576 и 2805 м, который равен 1429 и  $1578r10^{-3}$  ГсЧсм<sup>3</sup>/г соответственно [2]. Высокие показатели намагниченности насыщения пород, косвенно указывают на возможность образования магнитоупорядоченных минералов (например, магнетита или гетита) биогенным путем.

Действительно, ЖРБ были обнаружены во всех накопительных культурах с породами из разреза СГ-4 (табл.1). Результаты магнитных измерений биоосадков (табл. 2) указывают на образование магнитоупорядоченных соединений железа во всех вариантах накопительных культур, подтверждая литературные сведения о том, что наиболее предпочтительным субстратом для диссимиляционной железоредукции, сопровождающейся образованием магнитного минерала магнетита является, ацетат [3]. Намагниченность насыщения биоосадков накопительных культур (табл. 2) закономерно повышается с увеличением глубины залегания пород, из которых они были выделены, но в пределах одного порядка и не превышает 1,6 раза. Сопоставление величин  $s_{нас}$  биоосадка накопительных культур и породы, из которой они были выделены, позволяют заключить, что биогенное образование магнитоупорядоченных соединений может внести заметный вклад в магнитные свойства пород разреза СГ-4 только в верхнем из изученных нами горизонтов. Именно там, намагниченность насыщения биоосадка не менее чем в 2,2 раза превосходит величину  $s_{нас}$  породы. Аналогичное соотношение ранее было обнаружено для по-

Таблица 1. Численность микроорганизмов (кл/г породы) различных физиологических групп в туффитах, вскрытых СГ-4

№ п/п	Глубина, м	ЖРБ	СРБ	Тионовые		Гетеротрофные	
				ацидофилы	нейтрофилы	аэробы	анаэробы
1	1559	$10^2$	$10^2$	$10^3$	$10^2$	$10^3$	0
2	3976	$10^0$	$10^0$	–	–	–	$10^2$
3	4125	$10^2$	$10^0$	–	–	–	$10^1$

Примечание: «–» – показатель не определяли

Таблица 2. Намагниченность насыщения ( $s_{нас}$ ,  $r10^{-3}$  ГсЧсм<sup>3</sup>/г) туффитов, вскрытых СГ-4, и биоосадка накопительных культур железоредуцирующих бактерий

№ п/п	Глубина, м	Туффит	Биоосадок накопительной культуры ЖРБ, выращенной на		Гидроксид Fe(III)
			лактате	ацетате	
1	1559	20,9	44,1	56,0	18 1
2	3976	101,1	22,8	58,4	
3	4125	2268,0	72,3	77,8	

род, вскрытых ВГС в смешанной зоне [2], где наличие биогенного магнетита было доказано физическими методами анализа [10].

Таким образом, помимо гетеротрофных, азотфиксирующих, углеводород- и водородокисляющих, сульфатредуцирующих и метанобразующих микроорганизмов, обнаруженных ранее [8], нами

из пород разреза СГ-4 впервые выделены железоредуцирующие и тионовые бактерии. Показано, что ЖРБ способны к биогенному образованию магнитоупорядоченных соединений, которые могут влиять на магнитные свойства пород, изъятых с глубины 1559 м.

2.09.2011

**Список литературы:**

1. Pedersen K. Diversity and activity of microorganisms in deep igneous rock aquifers of the Fennoscandian shield / Subsurface microbiology and biogeochemistry / Ed. J.K. Fredrickson, M. Fletcher/ – New York: Wiley-Liss cop., 2001. – P. 97–139.
2. Shekhovtsova N.V., Osipov G.A., Verkhovtseva N.V., Pevzner L.A. Analysis of lipid biomarkers in rocks of Archean crystalline basement // Proceedings of SPIE. – 2003. – V.4939. – P. 160–168.
3. Lovley D.R., Philips E.J.P. Novel mode of microbial energy metabolism: organic carbon oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron or manganese // Appl. and Environ. Microbiol. – 1988. – V.54, № 6. – P. 1472–1480.
4. Практикум по агрохимии. /Под ред. В.Г.Минеева. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – С. 153.
5. Крамаренко Л.Е. Геохимическое и поисковое значение микроорганизмов подземных вод. – Л.: Недра, 1983. – 181 с.
6. Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. – М.: Наука, 1989. – 285 с.
7. Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский А.О. и др. Магнетизм почв. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 1995. – 223 с.
8. Amy P.S. Microbial dormancy and survival in the subsurface / The microbiology of the terrestrial deep subsurface /Ed. P.S. Amy, D.L. Haldeman. – New York: CRC Press LLC, 1997. – P. 185–203.
9. Оборин А.А., Иларионов С.А., Селезнев И.А., Хмурчик В.Т. Микробиологические исследования Уральской сверхглубокой скважины // Результаты бурения и исследований Уральской сверхглубокой скважины (СГ-4). Научное бурение в России: Сб. науч. тр. ФГУП НПП «Недра». – Ярославль, 1999. – Вып. 5. – С. 354–360.
10. Глубокое бурение в Пучезж-Катунской импактной структуре. – СПб: ВСЕГЕИ, 1999. – 392 с.

## Сведения об авторах

**Шеховцова Нина Валентиновна**, зав. кафедрой ботаники и микробиологии  
факультета биологии и экологии Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова,  
канд. биол. наук, доцент

150057, г. Ярославль, проезд Матросова, 9, каб. 311, тел. (4852)48-39-15, e-mail: ninval@mail.ru

**Верховцева Надежда Владимировна**, профессор кафедры агрохимии факультета почвоведения  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, доктор биологических наук,  
профессор, e-mail: verh48@list.ru

**UDC 622.24 (470.5)****Shekhovtsova N.V., Verkhovtseva N.V.**

Demidov Yaroslavl State University, e-mail: ninval@mail.ru

**IRON-REDUCING MICROORGANISMS INTO SUPERDEEP VOLCANIC ROCKS**

The first iron-reducing bacteria (IRB) to be studied into Ural superdeep well (SG-4) rocks with a microorganisms of the sulfur and carbon cycles. A wide spread of IRB was demonstrated as well as their possible participation in biogenic formation of magnetic mineral among which the magnetite is more abundant into SG-4 rocks. A permanent presence of sulfate-reducing bacteria was supported, thiobacteria were discovered.

Key words: superdeep wells, rocks, magnetic properties, iron-reducing bacteria, sulfur cycle, heterotrophic microorganisms.

## Bibliography:

1. Pedersen K. Diversity and activity of microorganisms in deep igneous rock aquifers of the Fennoscandian shield / Subsurface microbiology and biogeochemistry / Ed. J.K. Fredrickson, M. Fletcher/ – New York: Wiley-Liss cop., 2001. – P. 97–139.
2. Shekhovtsova N.V., Osipov G.A., Verkhovtseva N.V., Pevzner L.A. Analysis of lipid biomarkers in rocks of Archean crystalline basement // Proceedings of SPIE. – 2003. – V.4939. – P. 160–168.
3. Lovley D.R., Philips E.J.P. Novel mode of microbial energy metabolism: organic carbon oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron or manganese // Appl. and Environ. Microbiol. – 1988. – V.54, № 6. – P. 1472–1480.
4. Handbook of agrochemistry / Ed. by V.G. Mineev. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 659 p.
5. Kramarenko L.E. Geochemical and searching importance of underground water microorganisms. – Л.: Nedra, 1983. – 181 p.
6. Kuznetsov S.I., Dubinina G.A. Methods for studying of aquatic microorganisms. – М.: Nauka, 1989. – 285 p.
7. Babanin V.F., Truchin V.I., Karpachevskiy A.O. and others. Soil magnetism. – Yaroslavl: Izd-vo YaGTU, 1995. – 223 p.
8. Amy P.S. Microbial dormancy and survival in the subsurface / The microbiology of the terrestrial deep subsurface /Ed. P.S. Amy, D.L. Haldeman. – New York: CRC Press LLC, 1997. – P. 185–203.
9. Oborin A.A., Ilarionov S.A., Seleznev I.A., Khmurchik V.T. Microbiological investigations into Ural superdeep well // Results of drilling and investigations of Ural superdeep well (SG-4). Scientific drilling in Russia: Sb. науч. тр. FGUP NPTS "Nedra". – Yaroslavl, 1999. – Вып. 5. – P. 354–360.
10. Deep drilling in the Puchezh-Katunki impact structure. – SPb.: VSEDEI-Press, 1999. – 392 p.