

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КАРБОНАТНЫХ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТАХ С РАЗНЫМИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ КАК ОСНОВА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ БИОТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ НЕФТИ

Т. Н. Назина¹, Н. К. Кострюкова¹, Ю. В. Татаркин¹, Т. Л. Бабич¹, Д. Ш. Соколова¹,
В. С. Ивойлов¹, М. Р. Хисаметдинов², Р. Р. Ибатуллин², А. Б. Полтараус³, Т. П. Турова¹,
С. С. Беляев¹, М. В. Иванов¹

1– ИНМИ РАН, 2 – ТатНИПИнефть, 3 – ИМБ РАН, e-mail: nazina@inmi.host.ru

Введение

В связи с интенсивной разработкой нефтяных месторождений с терригенными коллекторами и легкой кондиционной нефтью в составе остаточных запасов возрастает доля нефти, залегающей в карбонатных коллекторах. Существующие методы позволяют извлекать около половины геологических запасов нефти из терригенных нефтяных пластов, тогда как из карбонатных коллекторов извлекается не более 20% нефти.

Микроорганизмы способны образовывать нефтевытесняющие метаболиты, такие как полимеры, поверхностно-активные вещества, газы, органические кислоты и растворители. Активность микроорганизмов в нефтяных пластах может быть основана на биодegradации введенных питательных веществ (типа мелассы) или на биодegradации части остаточной нефти в пласте [Беляев и др., 2004].

В настоящее время актуальна разработка биотехнологий повышения нефтеизвлечения из карбонатных нефтяных пластов, характеризующихся сложными геологическими, петрофизическими и гидродинамическими условиями и высоковязкой сернистой нефтью. Выбор биотехнологии повышения нефтеизвлечения основывается на знании геохимической активности микроорганизмов и условий конкретного нефтяного пласта. Микроорганизмы карбонатных нефтяных пластов относительно мало изучены, что и обусловило выполнение настоящей работы.

Целью работы является количественная оценка биогеохимических процессов в нефтяных месторождениях с карбонатными коллекторами, выделение микроорганизмов, образующих нефтевытесняющие метаболиты и снижающих содержание восстановленных соединений серы в пластовых флюидах, а также разработка теоретических основ биотехнологии повышения извлечения нефти из карбонатных нефтяных пластов с высокоминерализованной пластовой водой.

В 2012–2013 гг. работу проводили в рамках следующих задач.

1. Определить экологические условия, численность микроорганизмов и скорости сульфатредукции и метаногенеза в карбонатных нефтяных пластах с высокоминерализованной пластовой водой.

2. Выделить микроорганизмы, доминирующие в пластах с высокоминерализованной пластовой водой, и определить их способность образовывать нефтевытесняющие метаболиты (кислоты, растворители, биоПАВ, газы).

3. Исследовать образование биосурфактантов (биоПАВ) из нефти аэробными бактериями, выделенными из терригенных и карбонатных нефтяных пластов, и оценить влияние биоПАВ на вытеснение нефти.

4. Выполнить сравнительные молекулярно-биологические исследования разнообразия сульфидогенных микробных сообществ, осуществляющих анаэробную биodeградацию нефти в терригенных и карбонатных нефтяных пластах.

В ходе работ были изучены экологические условия и биогеохимические процессы в пластовых водах Ромашкинского и Архангельского нефтяных месторождений с карбонатными коллекторами, а также выполнены молекулярно-биологические исследования пластовой воды терригенного нефтяного месторождения Даган (КНР).

Основным объектом исследования в 2013 году были микроорганизмы, выделенные из карбонатных и терригенных нефтяных пластов. Пластовая вода карбонатных нефтяных коллекторов Ромашкинского и Архангельского месторождений характеризуется разной соленостью. Пластовая вода залежи 302 Ромашкинского месторождения имеет соленость 20–28 г/л и содержит около 300 мг сероводорода/л воды. Пробы пластовой воды Архангельского месторождения не содержат сероводород и имеют минерализацию 51–244 г/л, т.е. принадлежат к рассолам.

1. Методы исследований

Распространение и геохимическую деятельность микроорганизмов в нефтяных пластах и образование ими нефтевытесняющих метаболитов (биосурфактантов, биополимеров, растворителей и газов) изучали с использованием современных микробиологических, молекулярно-биологических и радиоизотопных методов и методов коллоидной химии, как указано в статьях [Назина и др., 2013; Nazina et al., 2013].

Микробиологическими методами определяли численность аэробных и анаэробных микроорганизмов основных метаболических групп в пробах пластовой воды. С

использованием соединений ($\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$, $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$ и $^{14}\text{CH}_3\text{COONa}$), меченных радиоактивными изотопами, дана количественная оценка скоростей современных биогенных процессов сульфатредукции, литоавтотрофного и ацетокластического

Путем определения индекса эмульгирования (E_{24}), поверхностного натяжения против воздуха и межфазного натяжения на границе культуральная жидкость / гексадекан (цетан) метаногенеза обнаруживали оверхностно-активные вещества в культуральных средах и в пластовой воде. Поверхностное и межфазное натяжение измерялись полустатическим методом отрыва кольца на полуавтоматическом тензиометре Surface Tensiomat 21 (Cole-Parmer, США).

Молекулярно-биологический анализ микробных сообществ нефтяных пластов и секвенирование ДНК был выполнен в центре коллективного пользования при ИМБ РАН (рук. ЦКП к.б.н. А.Б. Полтараус) с использованием автоматического секвенатора Applied Biosystems DNA Sequencer (ABI 3100 Avant Genetic Analyser), как указано в статьях [Назина и др., 2013; Nazina et al., 2013].

2. Результаты исследований

2.1. Микроорганизмы пластовой воды залежи 302 Ромашкинского нефтяного месторождения

Основные результаты, полученные в рамках выполнения 1-й и 2-й задач проекта, приведены в отчете за 2012 г. и в публикациях [Назина и др., 2012, 2013; Nazina et al., 2013].

В результате исследования нефтяной залежи 302 с карбонатным коллектором Ромашкинского месторождения охарактеризованы физико-химические условия в нефтяном пласте и численность микроорганизмов основных метаболических групп. Особенностью карбонатной нефтяной залежи, генетически связанной с морскими отложениями, является высокое содержание сульфатов в пластовой воде и высокая концентрация сероводорода, достигающая 300 мг/л воды и 0.3% – в газе. В этих условиях аэробные микроорганизмы не могут существовать, а доминирующим анаэробным процессом является сульфатредукция. Процесс образования метана был выявлен также радиоизотопным методом, но его активность была невелика. Культивируемые сульфатредуцирующие бактерии доминировали в составе микробного сообщества нефтяного пласта.

Исследован биотехнологический потенциал микробного сообщества залежи 302. Для разработки карбонатных нефтяных пластов предложен метод повышения нефтеизвлечения, сочетающий стимуляцию роста бродильных бактерий и подавление роста бактерий, образующих сероводород, в нефтяном пласте. Внесение нитратов в высокой концентрации будет способствовать активации роста денитрифицирующих бактерий (гены которых выявлены в составе библиотеки клонов), а также подавлению роста сульфатредуцирующих бактерий и снижению содержания сероводорода в пластовой воде. Жизнедеятельность бродильных бактерий нефтяного пласта активизируется традиционным методом посредством нагнетания в пласт через нагнетательные скважины раствора мелассы и минеральных солей азота и фосфора. Биотехнология является технологически простой и безопасной для окружающей среды [Назина и др., 2013].

2.2. Исследование образования биосурфактантов (биоПАВ) из нефти аэробными бактериями, выделенными из терригенных и карбонатных нефтяных пластов, и оценка влияния биоПАВ на вытеснение нефти

Выполнен поиск микроорганизмов – продуцентов биоПАВ в пластовых водах карбонатных и терригенных нефтяных пластов. Установлено, что микробное сообщество карбонатных нефтяных пластов практически не содержит аэробных бактерий, способных образовывать биоПАВ, вследствие чего необходимо вести поиск микроорганизмов, образующих биоПАВ при высокой солености среды, в других местообитаниях.

Способность к образованию биосурфактантов выявлена у широкого круга микроорганизмов. Микробное сообщество терригенных нефтяных пластов, эксплуатируемых с применением заводнения, включает аэробные, в том числе углеводородокисляющие, бактерии и анаэробные бродильные, сульфатредуцирующие и метанобразующие прокариоты. С нагнетаемой в пласт водой поступают растворенный кислород и микроорганизмы, что способствует развитию в призабойной зоне нагнетательных скважин аэробно-анаэробного микробного сообщества. Наибольший интерес представляют углеводородокисляющие бактерии, которые при росте на углеводородах нефти образуют поверхностно-активные вещества, способствующие проникновению углеводородов в клетку.

Выполнен поиск микроорганизмов – продуцентов биоПАВ в заводняемых терригенных нефтяных пластах, а также в соленых озерах.

Выделение продуцентов биосурфактантов из пластовой воды терригенных нефтяных пластов и определение их таксономического положения и физиологических характеристик. Отсутствие общей реактивной группы в молекулах поверхностно-активных веществ не позволяет разработать универсальный химический метод анализа этих веществ. Поиск продуцентов биосурфактантов вели, анализируя индекс эмульгирования и поверхностное и межфазное натяжение культуральных сред аэробных органотрофов и углеводородокисляющих бактерий.

Путем определения индекса эмульгирования были выбраны накопительные культуры, которые использовали для поиска продуцентов биосурфактантов. Методом последовательных пересевов было выделено и очищено 16 штаммов аэробных бактерий, которые на основании высокого сходства генов 16S рРНК (98–100%) были отнесены к известным видам *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas putida*, *Bacillus cereus*, *Bacillus licheniformis*, *Brachymonas petroleovorans*, *Pannonibacter phragmitetus*, *Rhodococcus ruber*, *Terpidiphilus margaritifer*, *Thauera aminoaromatica* (табл. 1) [Соколова, Бабич, 2012].

Кроме того, в работе исследовали бактерии *Rhodococcus ruber* 14Н, *B. licheniformis* 421, *Gordonia rubropertinctus* 321, *Cellulomonas cellulans* 23 и *Dietzia maris* 263, выделенные ранее [Назина и др., 2003]. Бактерии использовали растворимые органические субстраты – сахара (глюкозу, сахарозу, лактозу, фруктозу), низшие спирты, летучие кислоты (ацетат и бутират), глицерин и др. Большинство штаммов росли также на *n*-алканах (C₁₀–C₁₆) и сырой нефти.

Образование биоПАВ аэробными бактериями при росте на *n*-алканах и других субстратах. Способность бактерий продуцировать ПАВ из органических веществ разных классов представляется важной в условиях нефтяного пласта, где источником углерода служит нефть, являющаяся многокомпонентным веществом. Микроорганизмы, снижающие поверхностное натяжение культуральных сред более чем на 10 мН/м, считаются перспективными продуцентами ПАВ [Francy et al., 1991].

Закономерности образования биоПАВ одними и теми же микроорганизмами на водорастворимых и нерастворимых субстратах существенно различаются. У штамма *Rhodococcus ruber* 14Н, выращенного на этаноле, сахарозе и *n*-алканах, бесклеточный супернатант эмульсии не образовывал, тогда как индекс эмульгирования культуральной среды с клетками и собственно биомассы был высоким (25–50%), что может свидетельствовать об образовании родококками био-ПАВ, ассоциированных с клеточной

стенкой (эндо-тип) (табл. 2). Высокий индекс эмульгирования показали клетки родококков, выращенные на гексадекане (50%), что коррелировало с наименьшей величиной межфазного натяжения, составившей 1 мН/м.

Таблица 1

Таксономическая принадлежность аэробных бактерий, выделенных из терригенных нефтяных пластов, и реологические характеристики культуральной среды с сахарозой* (индекс эмульгирования – E₂₄, поверхностное натяжение – ПН и межфазное натяжение – МН)

Штамм	Ближайший родственный микроорганизм	Сходство генов 16S рРНК, %	E ₂₄ , %	ПН, мН/м	МН**, мН/м
D7-h	<i>Pseudomonas putida</i>	98	20	30.2	18.3
K12	<i>Pseudomonas putida</i>	99	50	56.4	22.6
D2-O	<i>Thauera aminoaromatica</i>	99	Н.д.	Н.д.	Н.д.
K14	<i>Brachymonas petroleovorans</i>	99	0	67.2	28.6
K16	<i>Pannonibacter phragmitetus</i>	99	10	52.4	24.6
32d	<i>Kocuria erythromyxa</i>	100	5	37	4
263	<i>Dietzia maris</i>	98.3	35	38	3
14	<i>Brevibacillus parabrevis</i>	98.2	40	45	15
421	<i>Bacillus licheniformis</i>	100	50	30	22 (10 ⁻²)***
321	<i>Gordona rubropertinctus</i>	100	20	35	30 (10 ⁻²)***
14Н	<i>Rhodococcus ruber</i>	100	100	40	37 (10 ⁻³)***
23	<i>Cellulomonas cellulans</i>	98.0	35	38	20 (10 ⁻²)***
62	<i>Bacillus cereus</i>	100	8	46	14
310-2-3	<i>Clavibacter michiganensis</i>	99.0	10	31	3
Контроль	Среда с сахарозой		0	50	16

Примечание «*» – среда с сахарозой, инкубировали в течение 12 сут при 45 °С; «**» – межфазное натяжение на границе раздела фаз культуральная среда с бактериями/гексадекан; «***» – разведение культуральной среды.

Клеточная суспензия и супернатант бактерии *B. licheniformis* 421, выращенной на сахарозе, вызывали эмульгирование гексадекана, что свидетельствовало о синтезе биосурфактантов эндо- и экзо-типов. Бактерии *P. aeruginosa* K1 и *P. putida* K12 также продуцировали биоПАВ экзо- и эндо-типов. Отмечено существенное снижение межфазного натяжения биомассой бактерии *P. aeruginosa* K1, выращенной на гидрофильных и на гидрофобных субстратах. Кроме того, штамм K1 продуцировал экзополисахариды, как из сахаров, так и из нефти.

Выделение поверхностно-активных продуктов и определение их химической природы. Бактерии *R. ruber* 14Н и *B. licheniformis* 421 продуцировали биосурфактанты, эффективные при наибольшем разведении культуральной среды (табл. 1). Бактерии растили в среде оптимизированного состава, содержащей сахарозу и аммонийный азот, при соотношении С:N – 10:1. Биосурфактанты выделяли из культуральной жидкости и из биомассы штаммов *B. licheniformis* 421 и *R. ruber* 14Н. БиоПАВ, выделенные из биомассы обоих штаммов, имели гликолипидную природу. Неочищенный биоэмульгатор из культуральной жидкости штамма 421 был представлен гликопептидным комплексом, содержащим также более 32% неидентифицированных жирных кислот.

Бактерии *R. ruber* 14Н и *B. licheniformis* 421 накапливали био-ПАВ в количестве 0.54 и 1.36 г/л среды соответственно, расход глюкозы составил 10 г/л.

В модельных экспериментах внесение даже небольшого количества (10% от объема жидкой фазы) культуральной среды *R. ruber* 14Н и *B. licheniformis* 421, содержащей биомассу, поверхностно-активные вещества, экзополисахариды и другие метаболиты, способствовало большему отмыванию нефти с песка, по сравнению с внесением стерильной среды. Биоэмульгатор, образуемый *R. ruber*, отмывал нефть более эффективно, чем биоэмульгатор, образуемый *B. licheniformis*.

Расход химически синтезированных ПАВ для заводнения нефтяного пласта составляет 0.2–2 г/л нагнетаемой воды. Как было отмечено ранее, значения ККМ химически синтезированных ПАВ выше значений ККМ био-ПАВ на несколько порядков. По эффективности био-ПАВ сравнимы или превосходят химически синтезированные ПАВ. Таким образом, культуральные среды бактерий *R. ruber* шт. 14Н и *B. licheniformis* шт. 421 можно использовать в качестве био-ПАВ для нагнетания в нефтяной пласт.

Выделение микроорганизмов – продуцентов биоПАВ из соленых озер. Поскольку аэробные бактерии отсутствовали в карбонатных нефтяных пластах с

высокоминерализованной пластовой водой и высоким содержанием сероводорода, то поиск возможных продуцентов биоПАВ проводили в пробах воды из соленых озер.

Таблица 2

Реологические характеристики культуральной среды с клетками (кс), культуральной жидкости без клеток (кж) и биомассы (бм) аэробных бактерий, выделенных из терригенных нефтяных пластов

Штамм, субстрат	ПН кс, мН/м	МН кс, мН/м	Е ₂₄ кс, %	ПН кж, мН/м	МН кж, мН/м	Е ₂₄ кж, %	ПН бм, мН/м	МН бм, мН/м	Е ₂₄ бм, %
<i>Rhodococcus ruber</i> 14Н									
Сахароза	55.4	20.1	25	45.0	19.2	0	55.2	17.2	50
Этанол	51.5	17.9	10	48.1	20.3	0	49.1	15.8	8
н-Алканы	16.0	3.0	40	45.6	20.4	0	25.0	1.0	50
<i>Pseudomonas putida</i> К12									
Сахароза	52.8	8.3	50	50.1	21.0	60	54.1	11.5	50
Этанол	44.5	25.1	0	59.5	31.2	0	62.4	34.0	0
н-Алканы	46.3	24.3	2	54.3	28.2	0	56.9	29.2	3
<i>Bacillus licheniformis</i> 421									
Сахароза	41.1	16.2	50	43.5	24.1	10	40.2	15.1	30
Этанол	51.8	32.1	0	61.2	34.2	0	52.0	22.3	0
н-Алканы	48.0	30.1	10	50.0	21.9	0	41.0	18.1	5

Выделены и охарактеризованы два штамма – *Bacillus licheniformis* S10 и S8, образующие поверхностно-активные вещества при аэробном росте на богатой среде с глюкозой, бакто-триптоном и дрожжевым экстрактом. Выполнен подробный факторный

эксперимент, в котором при одинаковом посевном материале варьировали температуру инкубации штаммов от 28 до 55 °С и содержание NaCl в среде от 0 до 10% (вес/об). У выросших культур определяли оптическую плотность (OD_{600} , данные не представлены), эмульгирующую активность, поверхностное и межфазное натяжение (на границе культуральная среда/углеводород) [Соколова, 2013].

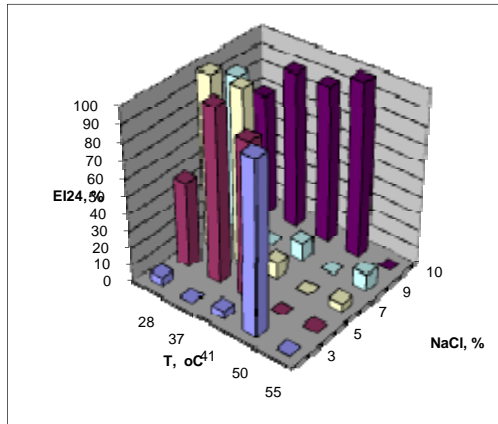
При росте штамма S10 отмечен высокий индекс эмульгирования культуральной среды с бактериями, достигающий 100%, в широком интервале температур от 28 до 50 °С и солености от 5 до 10% NaCl (рис. 1 А, С, Е). Прямая корреляция между индексом эмульгирования и содержанием биомассы в среде, определяемой по оптической плотности, не наблюдалась, вероятно, вследствие образования мощной биопленки, которая не позволяла достоверно определить величину оптической плотности.

Более равномерное образование микробной биомассы в средах с различным содержанием NaCl наблюдали при температуре инкубации 50 °С, хотя локальные максимумы накопления биомассы отмечены также при 28 °С и солености 5% NaCl и при 41 °С и солености 9% NaCl. Поверхностное натяжение культуральной среды с бактериями варьировало в интервале от 37 до 57 mN/m, наименьшие значения 37, 40 41 mN/m отмечены при культивировании штамма S10 при температуре 37 °С и солености 7, 9 и 10% NaCl соответственно, величина поверхностного натяжения 40 mN/m зарегистрирована также при температуре 50 °С и солености 9% NaCl (рис. 1, А, С, Е). Межфазное натяжение среды против декана варьировало в исследованных посевах от 13 до 25 mN/m. Низкие значения межфазного натяжения 12–16 mN/m отмечены в посевах, инкубируемых при 28, 37 и 50 °С и солености 7–9% NaCl.

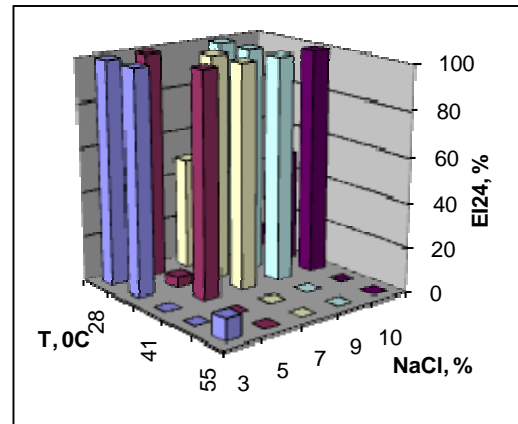
Аналогичные исследования *Bacillus licheniformis* S8 позволили выявить хороший рост и образование биомассы во всем исследованном интервале солености и температур с максимумом при 7% NaCl и 37 °С соответственно. Эмульгирующие соединения образовывались во всем исследованном интервале солености среды от 0 до 10% NaCl, но в более узком диапазоне температур от 28 до 41 °С (рис. 1 В, D, F).

Таким образом, выделены штаммы *Bacillus licheniformis* S10 и S8, способные образовывать биосурфактанты и биоэмульгаторы в широком интервале температур и солености среды. Культуральные среды этих бактерий могут быть рекомендованы для нагнетания в карбонатные и терригенные нефтяные пласты, характеризующиеся высокой температурой и соленостью, с целью повышения нефтеизвлечения.

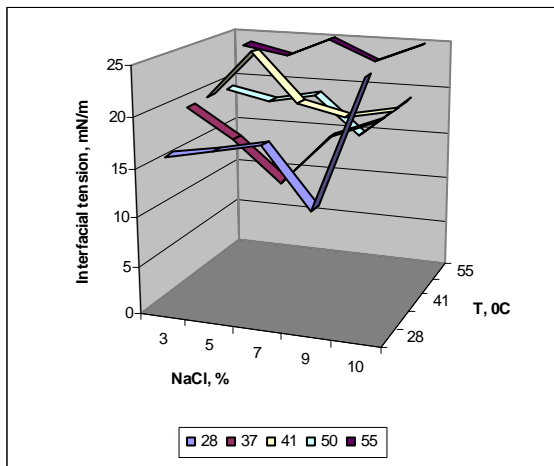
A



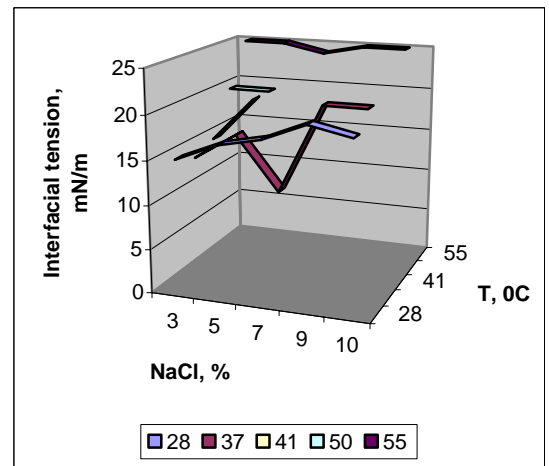
B



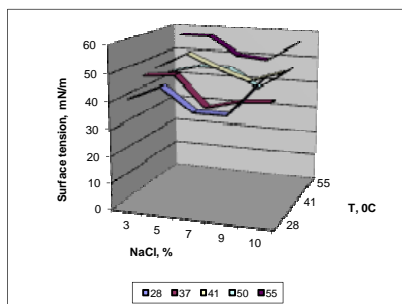
C



D



E



F

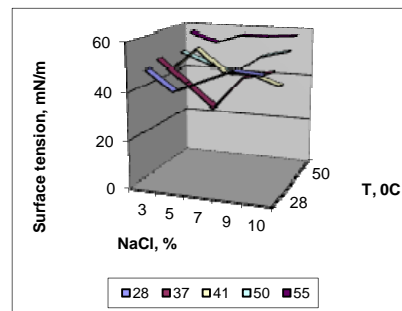


Рис. 1. Индекс эмульгирования (EI_{24}) культуральной среды (A, B), поверхностное натяжение (E, F) и межфазное натяжение против декана (C, D) культуральной среды бактерий *Bacillus licheniformis* S10 (A, C, E) и S8 (B, D, F), растущих при разной температуре и солености

2.3. Сравнительные молекулярно-биологические исследования разнообразия сульфидогенных микробных сообществ, осуществляющих анаэробную биodeградацию нефти в терригенных и карбонатных нефтяных пластах

Выполнен сравнительный анализ состава микроорганизмов пластовой воды и накопительных культур бактерий, образующих сероводород при росте в среде с сульфатом и сырой нефтью, выделенных из карбонатной нефтяной залежи 302 Ромашкинского месторождения и из пластовой воды терригенной нефтяной залежи Кондиан месторождения Даган (КНР).

На основе изучения филогенетического разнообразия микроорганизмов в пластовой воде карбонатной нефтяной залежи 302 Ромашкинского нефтяного месторождения были обнаружены гены 16S рРНК сульфатредуцирующей бактерии *Desulfoglaeba alkanexedens*, способной расти на индивидуальных *n*-алканах, что свидетельствует о возможности одноступенчатого распада нефти в пласте в отсутствие бродильных, синтрофных и метанобразующих прокариот [Назина и др., 2013; Nazina et al., 2013]. Кроме того, выявлены последовательности бактерий, способных окислять сероводород в присутствии нитратов.

В составе библиотеки архейных клонов генов 16S рРНК, созданных на основе ДНК пластовой воды из терригенной нефтяной залежи Ганси, было получено и проанализировано 170 клонов. Все нуклеотидные последовательности архей были близки таковым филума *Euryarchaeota* и распределились между порядками *Methanomicrobiales*, *Methanosarcinales* и *Methanobacteriales*. В библиотеке клонов пластовой воды выявлены гены 16S рРНК только водород-использующих метаногенов *Methanobacterium congolense*, *Methanobacterium* sp. и *Methanococcus vannielii*.

В составе библиотеки бактериальных клонов генов 16S рРНК пластовой воды залежи Ганси было проанализировано 146 последовательностей. Доминирующие филоотипы 7bC и 1bC включали 89 и 36 нуклеотидных последовательностей и были близки последовательностям *Thermoanaerobacterium saccharolyticum* филума *Firmicutes*. Представители этого вида являются термофильными анаэробами, растут в интервале рН от 5.0 до 7.5 при температуре от 45 до 68–70 °С, с оптимумом при 60 °С. Основными субстратами являются сахара, которые сбраживаются до этанола и лактата. Бактерии восстанавливают тиосульфат до элементной серы, которую откладывают на клетках. В

библиотеке клонов пластовой воды не были выявлены флотипы сульфатредуцирующих бактерий, несмотря на их обнаружение в пластовой воде (десятки клеток в 1 мл) и зарегистрированный процесс сульфатредукции. Результаты молекулярно-биологических исследований свидетельствуют о численном преобладании флотипов метаногенов в библиотеке клонов и подтверждают доминирование процесса метаногенеза в терригенной нефтяной залежи Ганси.

Инновационный характер проекта. На основе проведенных исследований предложен метод повышения нефтеизвлечения для карбонатных нефтяных пластов, сочетающий стимуляцию роста бродильных бактерий и подавление роста бактерий, образующих сероводород, в нефтяном пласте. Внесение нитратов в высокой концентрации будет способствовать активации роста денитрифицирующих бактерий (гены которых выявлены в составе библиотеки клонов), а также подавлению роста сульфатредуцирующих бактерий и снижению содержания сероводорода в пластовой воде. Жизнедеятельность бродильных бактерий нефтяного пласта активизируется традиционным методом – посредством нагнетания в пласт через нагнетательные скважины раствора мелассы (или других органических субстратов) и минеральных солей азота и фосфора. Биотехнология является технологически простой и безопасной для окружающей среды.

Новизна настоящей работы состоит в определении основных микробных процессов, биоразнообразия и характера распространения микроорганизмов в карбонатных нефтяных коллекторах с разными физико-химическими условиями. На основе фундаментальных исследований предложен способ повышения нефтеизвлечения, сочетающий стимуляцию роста бродильных бактерий (образующих летучие кислоты, растворители и газы) и подавление роста бактерий, образующих сероводород, в нефтяном пласте. Выделены микроорганизмы–продуценты поверхностно – активных веществ, устойчивые к повышенной солености среды (до 100 г/л), которые могут быть рекомендованы для закачки в нефтяные пласты с высокоминерализованными водами с целью повышения нефтеизвлечения.

Научное и практическое значение. Проведенные исследования позволяют получить новые научные результаты в области нефтяной микробиологии и биodeградации нефти, которые необходимы для разработки микробных биотехнологий повышения

нефтеизвлечения из карбонатных нефтяных пластов и снижения содержания сульфидов в пластовых флюидах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беляев С.С., Борзенков И.А., Назина Т.Н., Розанова Е.П., Глумов И.Ф., Ибатуллин Р.Р., Иванов М.В.* Использование микроорганизмов в биотехнологии повышения нефтеизвлечения // Микробиология. 2004. Т. 73, № 5. С. 687–697
2. *Nazina T.N., Shestakova N.M., Pavlova N.K., Tatarkin Yu.V., Ivoilov V.S., Khisametdinov M.R., Sokolova D.Sh., Babich T.L., Tourova T.P., Poltaraus A.B., Belyaev S.S., Ivanov M.V.* Functional and phylogenetic microbial diversity in formation waters of a low-temperature carbonate petroleum reservoir // Int. Biodet. Biodeg. 2013. Vol. 81. P. 71–81. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.07.008>.
3. *Назина Т.Н., Павлова Н.К., Татаркин Ю.В., Шестакова Н.М., Бабич Т.Л., Соколова Д.Ш., Ивойлов В.С., Хисаметдинов М.Р., Ибатуллин Р.Р., Беляев С.С., Иванов М.В.* Разработка биотехнологии повышения степени извлечения нефти из карбонатных нефтяных коллекторов на территории Республики Татарстан // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика: Электрон. науч. журн. 2012. Вып. 2(6). – Режим доступа: [www.http://oilgasjournal.ru](http://www.oilgasjournal.ru)
4. *Назина Т.Н., Павлова Н.К., Татаркин Ю.В., Шестакова Н.М., Бабич Т.Л., Соколова Д.Ш., Ивойлов В.С., Хисаметдинов М.Р., Ибатуллин Р.Р., Турова Т.П., Беляев С.С., Иванов М.В.* Микроорганизмы карбонатной нефтяной залежи 302 Ромашкинского месторождения и их биотехнологический потенциал // Микробиология. 2013. Т. 82, № 2. С. 191–202.
5. *Назина Т.Н., Соколова Д.Ш., Григорьян А.А., Сюэ Ян Фен, Беляев С.С., Иванов М.В.* Образование нефтewытесняющих соединений микроорганизмами из нефтяного месторождения Дацин (КНР) // Микробиология. 2003. Т. 72, № 2. С. 206–211.
6. *Francy D.S., Thomas J.M., Raymond R.L., Ward C.H.* Emulsification of hydrocarbons by subsurface bacteria // J. Ind. Microbiol. 1991. V. 8. P. 237-246.
7. *Соколова Д.Ш., Бабич Т.Л.* Образование поверхностно-активных веществ аэробными бактериями, выделенными из нефтяных пластов // Актуальные аспекты современной микробиологии: VIII молодежная школа-конференция с международным участием, Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН, Москва, 29–31 октября 2012 г.: тезисы. – М.: МАКС Пресс, 2012. С. 160–163.

8. Соколова Д.Ш. Образование биоэмульгаторов и поверхностно-активных веществ галотолерантными и термотолерантными штаммами *Bacillus licheniformis* S10 и S8 // Материалы Седьмого московского международного конгресса "Биотехнология: состояние и перспективы развития", Москва, Россия, 19–22 марта 2013 г. – М., 2013.– Ч. 2. С. 206.