

УДК 622.7

**Е.А. Гроо, Н.К. Алгебраистова, А.М. Жижаев,
А.С. Романченко, А.В. Макшанин**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ
ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ
ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ ТРУДНООБОГАТИМОГО
СЫРЬЯ***

Дана оценка возможности использования ультразвука для повышения технологических показателей процесса выщелачивания золота из продуктов обогащения золото-кварцевой руды. Приводятся результаты исследований, позволяющих объяснить положительный эффект ультразвукового воздействия.

Ключевые слова: ультразвук, цианирование, сульфиды, кавитация, извлечение, концентрат, минеральная поверхность.

Для интенсификации процессов обогащения минерального сырья, переработки некондиционных и забалансовых руд, руд с тонкой вкрапленностью ценных компонентов перспективны способы активации, основанные на физических воздействиях.

Перспективным способом является акустическая (ультразвуковая) обработка, применением которой достигается повышение эффективности процессов эмульгирования веществ, диспергирования, очистки поверхностей, дегазации, экстрагирования, измельчения и многих других.

При прохождении ультразвука через жидкие и жидко-дисперсные среды возникает явление кавитации и ряд сопутствующих эффектов – радиационное давление, электрические

разряды, микротечения и т.д. Благодаря вышеперечисленным явлениям достигается интенсификация технологических процессов в ультразвуковом поле [1].

Учитывая затраты на образование ультразвука, применение его в технологиях обогащения может быть оправдано лишь для обработки богатых продуктов с малым выходом и для ценных компонентов, имеющих высокую стоимость. Несмотря на многочисленные исследования [2-5], начатые еще в первой половине двадцатого века, ультразвуковая технология не получила в тот период широкого распространения ввиду отсутствия возможности обрабатывать большие объемы сред, сложности и высокой стоимости генераторов и излучателей ультразвука, недостаточной изученно-

*Исследования выполнены в рамках проекта 2.1.2/4741 «Комплексные исследования традиционных и биотехнологических методов обогащения и переработки руд цветных и благородных металлов» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» и проекта № 13120 «Разработка эффективной технологии извлечения золота из руды на основе применения ультразвуковых воздействий» по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.»).

сти процессов, происходящих под воздействием ультразвука.

В настоящее время созданы высокоэффективные технологические аппараты на основе пьезокерамических колебательных систем и генераторы, позволяющие поддерживать заданный режим ультразвукового воздействия, что способствует уменьшению затрат и обеспечению надежности в использовании.

Для решения каждой технологической задачи существуют свои оптимальные параметры акустических воздействий, позволяющие добиться максимального эффекта.

В Сибирском федеральном университете проводятся различные исследования по интенсификации процессов извлечения золота из труднообогатимого сырья [6].

Проведены исследования по изучению влияния ультразвуковой обработки черновых золотосодержащих концентратов перед цианированием.

Концентраты получены из двух проб малосульфидной руды одного из месторождений Красноярского края. Вещественный состав представлен основным рудным минералом – пиритом в количестве 1-3 %, в меньшем количестве встречаются арсенопирит, пирротин и халькопирит. Основным нерудным минералом является кварц, содержание которого в руде более 40%, в значительном количестве присутствуют мусковит и альбит. Распространены среди нерудных минералов также хлорит и кальцит.

Полуколичественным спектральным анализом установлено, что руда обеднена по количеству примесей, за исключением мышьяка, висмута и вольфрама.

Эксперименты по изучению влияния ультразвуковой обработки на процесс цианирования осуществлялись на материале, представляющем

собой объединенный продукт, состоящий из легкой фракции концентратного стола Gemeni GT60 и флотационного концентрата.

Концентраты с содержанием золота 7,5 г/т в крупности -0,1+0 мм подвергались ультразвуковой обработке в ванне Sonorex super RK1028H с мощностью генератора излучений 300 Вт и частотой излучений 35 кГц.

Определено, что при цианировании исходного продукта извлечение золота в раствор составило 88,4%. Ультразвуковая обработка продукта в течение 20 мин. способствует значительному повышению извлечения золота в раствор, получен прирост извлечения 8,2 %. При этом содержание золота в хвостах цианирования уменьшилось с 0,87 г/т до 0,25 г/т.

Для проверки полученных в лабораторных условиях данных были проведены исследования на текущих пульпах, перерабатываемых на золотоизвлекательной фабрике «Советская» в Северо-Енисейском районе.

В настоящее время фабрика перерабатывает руды месторождений «Татьянинское», «Эльдorado» и карьера «Северо-Западный» с содержанием золота 2,4-2,6 г/т, 2,0 г/т, 1,8 г/т соответственно.

Руды трех месторождений относят к малосульфидному типу: суммарное количество сульфидов не более 1-1,5%. Минеральный состав представлен нерудными минералами кварцем, мусковитом, хлоритом, встречаются калиевые полевые шпаты, плагиоклаз и серицит. Рудные минералы представлены пиритом, арсенопиритом, галенитом. Присутствуют оксидные минералы железа, представленные магнетитом, реже гётитом и лимонитом.

Золотоизвлекательная фабрика работает по гравитационно-флотационной технологии с цианированием

Таблица 1

Режим цианирования продуктов обогащения

Параметр	Значение
Концентрация NaCN, % (мг/л)	0,15 (1500)
pH среды	10,3-10,5
Сорбент (марка)	Слабоосновной анионит (AM-2Б)
Объем сорбента	4% от объема пульпы
Объем пульпы, л	0,250
Общее время цианирования, ч	24
без сорбента, ч	15
в присутствии сорбента, ч	9

Таблица 2

Результаты цианирования продуктов обогащения, обработанных ультразвуком

Время обработки, мин	Среднее содержание золота в хвостах цианирования, г/т	Среднее содержание золота в растворе, мг/л	Среднее извлечение золота в раствор, %
Исходный флотоконцентрат с содержанием 13,5 г/т			
0	2,0	0,84	85,19
5	1,95	0,93	85,56
10	1,15	1,20	91,48
20	1,6	1,30	88,15
Исходный сгущенный продукт с содержанием 21,6 г/т			
0	2,1	1,8	90,27
10	1,2	1,8	94,44

чернового концентрата после сгущения.

Эксперименты осуществлялись на пробах сгущенного продукта и концентрата основной флотации с содержанием золота 17,5 г/т и 13,5 г/т соответственно.

Режим подготовки проб к цианированию определялся временем ультразвуковой обработки на аппарате Sonorex super RK 1028H, при этом выдерживалось содержание твердого в пульпе 50 %. Крупность обрабатываемых продуктов – 95 % кл. -0,071 мм. Цианирование осуществлялось в режиме, представленном в табл. 1.

Показатели цианирования проб пенистого продукта основной флотации и сгущенного продукта представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, при цианировании исходного флотоконцентра-

та удалось извлечь 85,19 % золота, содержание ценного компонента в хвостах при этом составило 2,0 г/т. С увеличением времени ультразвуковой обработки от 0 до 20 мин. содержание золота в цианистом растворе увеличивается более чем на 54 %.

Результаты экспериментов, представленные в табл. 2, показывают, что при увеличении времени ультразвуковой обработки флотационного концентрата до 10 мин. наблюдается закономерное уменьшение содержания золота в хвостах цианирования, дальнейшее увеличение времени воздействия ультразвуком ведет к возникновению тенденции повышения содержания ценного компонента в хвостах.

Максимальный прирост извлечения золота в раствор при обработке продуктов обогащения достигнут при 10 мин. воздействий, при этом содержание

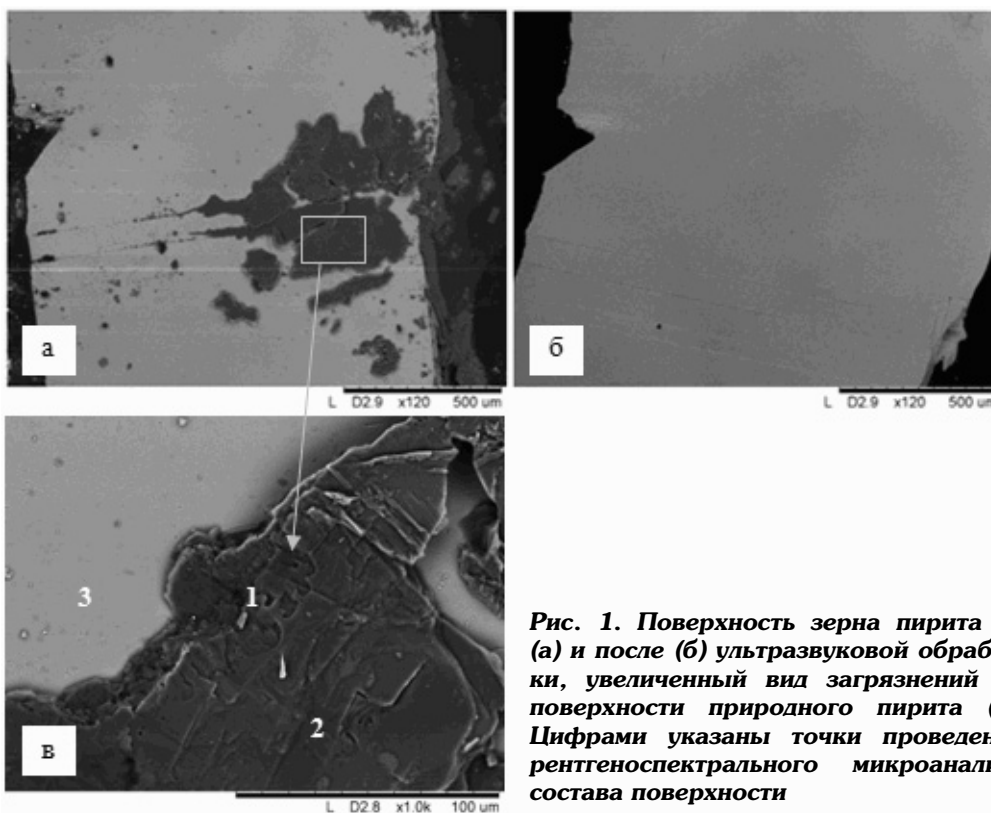


Рис. 1. Поверхность зерна пирита до (а) и после (б) ультразвуковой обработки, увеличенный вид загрязнений на поверхности природного пирита (в). Цифрами указаны точки проведения рентгеноспектрального микроанализа состава поверхности

золота в хвостах цианирования уменьшилось в среднем на 57 %.

Полученные результаты объясняются высвобождением частиц золота от плотных поверхностных пленок под действием ультразвуковых колебаний.

Данное положение подтверждается увеличением содержания золота в цианистом растворе при наложении акустического поля, как видно из табл. 2, а также данными растровой электронной микроскопии, представленными на рис. 1.

Изображения на рисунках получены на микроскопе Hitachi TM-1000 в обратно отраженных электронах.

На рис. 1 представлено изображение зерна пирита, селективно выделенного механическим путем из порообразующих минералов.

Перед обработкой его внедрили в полимерную подложку из этилметакрилата, полимеризующегося в течение 1 мин. под действием ультрафиолетовых лучей (мощность излучения 36 Вт), для обеспечения одинаковых условий рассмотрения объекта до и после ультразвуковой обработки. После обработки подложка с зафиксированным на ней зерном извлекалась из ультразвуковой ванны, высушивалась и помещалась на предметный столик электронного микроскопа. Наблюдения проводили при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Были получены данные по составу поверхностной пленки, которая отчетливо видна на рис. 1, а (необработанный пирит). Увеличенная фотография поверхностного загрязнения приведена на рис. 1, в, а результаты

Таблица 3

**Результаты рентгеноспектрального микроанализа
различных участков поверхности природного пирита
(положение участков указано цифрами на рис. 1, в)**

№ участка	Элемент, %							
	Na	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Cu
1	7,6	16,3	48,3	14,2	1,2	1,0	10,6	0,6
2	-	20,0	25,3	14,5	16,9	-	23,0	0,4
3	-	3,3	-	51,7	-	-	45,0	-

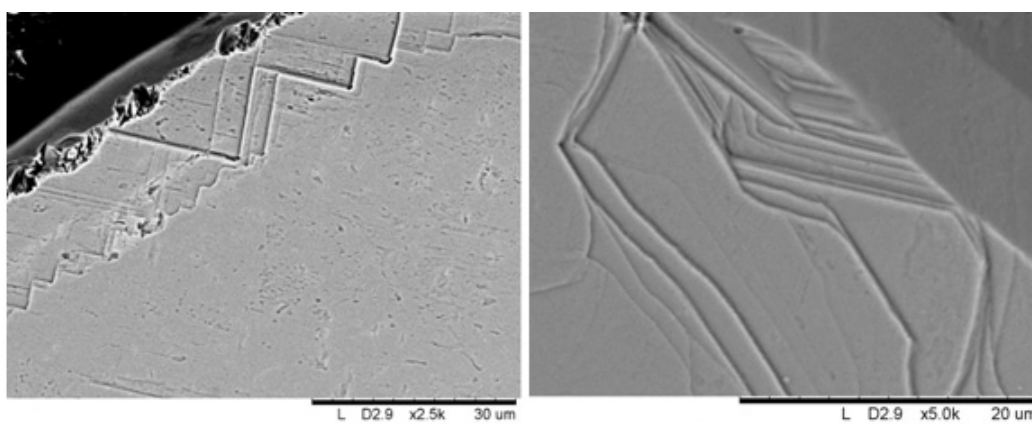


Рис. 2. Микрофотографии участков зерна пирита, обработанного ультразвуком, с обнажившейся штриховкой

микроанализа его различных участков приведены в табл. 3.

По данным микроанализа, поверхность пирита (табл. 3, участок 3) загрязнена плотными корками глинистых минералов (табл. 3, участки 1 и 2). Обнаружено, что в результате ультразвуковой обработки с поверхности полностью удаляются любые загрязнения, присутствовавшие на природном пирите (рис. 1, б, 2, 3), а также тонкие корки кварца и глинистые примазки.

На обработанной ультразвуком поверхности пирита полностью отсутствуют какие-либо примеси (рис. 1, б). На чистой поверхности зерна обнажилась грубая штриховка, характерная для пирита и невидимая ранее (рис. 2).

Помимо вышеуказанных результатов, выявлены значительные измене-

ния в морфологии поверхности, характеризующиеся образованием механических дефектов в виде многочисленных каналов разного размера и кратеров, образовавшихся после ультразвуковой обработки (рис. 3).

Для изучения механизма действия ультразвука на поверхность минералов выполнены исследования по ультразвуковой обработке золотосодержащих сульфидных образцов (представленных пиритом и халькопиритом) с применением метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) с использованием рентгеновского микроанализатора SPECS (Германия).

На рис. 4 приведены рентгеноэлектронные спектры 2р-линий Fe (а) и S (б) до и после обработки ультразвуком.

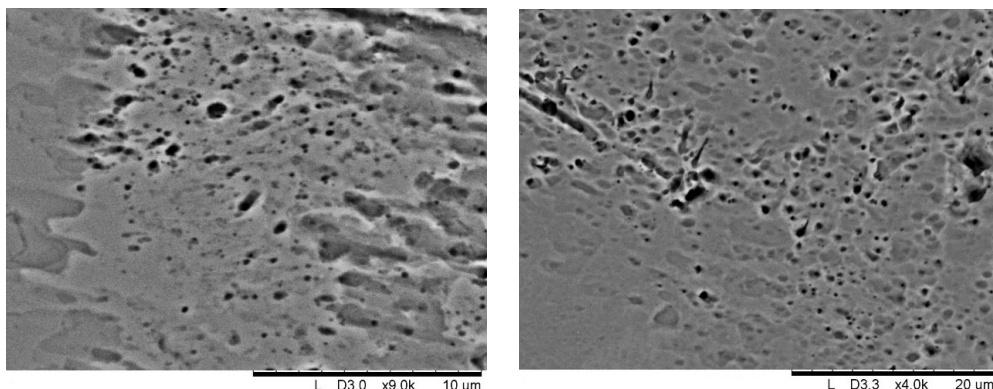


Рис. 3. Механические дефекты, образованные на поверхности природного пирита под действием ультразвука

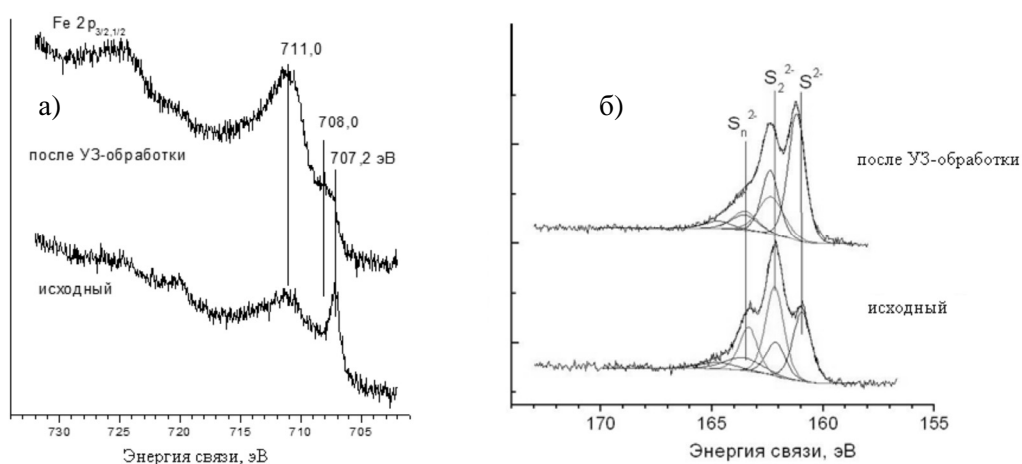


Рис. 4. Рентгеноэлектронные спектры 2p-линий Fe (а) и S (б) до и после обработки ультразвуком

В табл. 4 представлены относительные концентрации и результаты разложения фотоэлектронных спектров сульфидного образца до и после ультразвуковой обработки.

Результаты показали, что в исходном образце, в пределах анализируемого слоя (порядка 2 нм), основная часть железа находится в низкоспиновом состоянии Fe^{2+} , характерном для пирита (узкий пик с энергией связи $E_{св}=707,2$ эВ), но после ультразвуко-

вой обработки интенсивность полосы низкоспинового железа Fe^{2+} падает и растет максимум окисленного железа Fe^{3+} при $E_{св}=711$ эВ.

На пирите происходит некоторое разупорядочение поверхностного слоя, что приводит к разрыву связей между атомами серы в дисульфидных группах с образованием моносульфидных ионов, а Fe^{2+} переходит из низкоспинового состояния в высокоспиновое или (и) окисленную форму.

Таблица 4

Относительные концентрации форм серы по результатам разложения спектров фотоэлектронной линии S 2p_{3/2} сульфидного образца до и после ультразвуковой обработки

Образец	S 2p _{3/2}	
	Энергия связи, эВ	Концентрация, %
Исходный	161,26	38
	162,49	51
	164,03	11
После УЗ-обработки	161,19	60
	162,33	27
	163,54	13

В результате ультразвуковой обработки возрастает интенсивность линий моносльфидных и, в небольшой степени, полисульфидных ионов, количество которых меняется на 22 % и 2% соответственно. После ультразвуковой обработки также снижается количество углерод- и кислородсодержащих загрязнений.

Установлено, что ультразвуковое воздействие способствует, с одной стороны, разупорядочению, окислению и растворению (коррозии) поверхности минералов, а с другой стороны удаляет с поверхности оксигидроксиды Fe³⁺ и другие загрязнения. Второй эффект особенно сильно выражен и является преобладающим.

Обнаружено, что халькопирит под действием ультразвука корродирует сильнее, чем пирит, с образованием железodefицитной поверхности. Ионы железа вымываются с поверхности халькопирита в первую очередь, при этом происходит образование сульфидов меди Cu_{1-x}S.

Полученные результаты позволили объяснить эффект, обнаруженный в результате предварительной обработ-

ки проб ультразвуком и цианирования, а также сделать следующие выводы:

- окисление поверхностного двухвалентного железа до трехвалентного с образованием оксигидроксидов оказывает благоприятное воздействие при цианировании, поскольку эти соединения не позволяют цианиду связываться в железисто-синеродистые соединения;

- изменение морфологии поверхности и образование на ней микроканалов, кратеров и других механических дефектов способствует увеличению площади контакта золотосодержащих сульфидов с выщелачивающими агентами, а, следовательно, и эффективности процессов цианирования.

Таким образом, настоящими исследованиями установлена принципиальная возможность использования ультразвука для повышения эффективности процессов выщелачивания золота. Результаты позволяют предложить ряд объяснений положительного эффекта такого воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелев В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев,

Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. Алт. гос. ун-т, БТИ. - Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. - 400 с.

2. Шутьгин А.И. Акустическая технология в обогащении полезных ископаемых /

А.И. Шульгин, Л.И. Назарова, В.И. Рехтман и др. /Под ред. В.С. Ямшикова // -М.: Недра, 1987. – 232 с.

3. Глембоцкий В.А. Ультразвук в обогащении полезных ископаемых / В.А. Глембоцкий, М.А. Соколов, И.А. Якубович и др. // Алма-Ата: Наука, 1972. – 229 с.

4. Ревнивцев В.И. Обогащение полевых шпатов и кварца. // -М.: Недра, 1970. – 250 с.

5. Агранат Б.А. Ультразвуковая технология / Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Ю. И. Китайгородский, Н. Н. Хавский // -М.: Metallurgy, 1974. – 504 с.

6. Алгебраистова Н.К. Агломерационная флокуляция как способ извлечения золота из техногенных месторождений /Н.К. Алгебраистова, А.В. Макшанин // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 3 (2011 4) – p.283-295.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Гроо Е.А. - ассистент, каф. «Обогащение полезных ископаемых», ИЦМиМ СФУ,
Алгебраистова Н.К. – кандидат технических наук, доцент, ИЦМиМ СФУ,
Жижаев А.М. - кандидат технических наук, зав. лабораторией, ИХХТ СО РАН,
Романченко А.С. - кандидат технических наук, ИХХТ СО РАН,
Макшанин А.В. – ведущий инженер, ИЦМиМ СФУ.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (ПРЕПРИНТ)

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ОСВОЕНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВИДОВ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Альмов Сергей Витальевич, аспирант, кафедра «Экономика и менеджмент в нефтегазовом комплексе», Инженерно-экономический университет, e-mail: alex.ilinsky@bk.ru,

Бочкарев Александр Сергеевич, доктор экономических наук, профессор, зав. кафедрой,
Бочкарев Эдуард Александрович, кандидат экономических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики.

Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). — 2011. — № 12. — 16 с. — М.: Издательство «Горная книга».

Рассмотрены основные группы ресурсов нетрадиционных источников углеводородов. Обоснованы критерии и количественные показатели оценки экономической эффективности освоения ресурсов нетрадиционных источников углеводородного сырья. Рассмотрены приоритеты изучения и освоения нетрадиционных видов углеводородного потенциала России.

ECONOMIC EVALUATION OF PRIORITY DEVELOPMENT OF UNCONVENTIONAL HYDROCARBON

Alymov S.V., Bochkarev A.S., Bochkarev A.A.

The main group of unconventional hydrocarbon resources. Based criteria and quantitative indicators to assess the economic efficiency of resource development of unconventional sources of hydrocarbons are considered priorities for research and development of unconventional hydrocarbon potential of Russia.