

УДК 553.541 + 622.354.1

ИЗУЧЕННОСТЬ РЕСУРСОВ СЛАНЦЕВОГО ГАЗА И ГАЗОНОСНЫХ СЛАНЦЕВ

STUDY OF THE RESOURCES OF SHALE GAS AND GAS-BEARING SHALES

Кочергин Максим Александрович

студент-магистрант,
институт Нефти, газа и энергетики,
Кубанский государственный
технологический университет
kochergin.m13@gmail.com

Аннотация. XXI век уже давно прогнозируется, как век истощения основной части традиционных запасов ископаемого топлива и наступает время разработки нетрадиционных ресурсов углеводородов. Нетрадиционные ресурсы углеводородов означают ту часть ресурсов нефти и газа, подготовка и освоение которых нуждаются в разработке новых методов и способов выявления, разведки, добычи, переработки и транспорта. К основным нетрадиционным ресурсам природного газа относятся сланцевый газ, метан угольных пластов, газ в плотных песчаниках и др. Благодаря прогрессу в технологиях разработки и эксплуатации, эти ранее неизвлекаемые запасы теперь становятся извлекаемыми. Добыча углеводородов из сланцевых месторождений имеет специфические особенности. В силу высокой плотности и прочности сланцев для высвобождения нефти и газа из порового пространства практически единственным приёмом является разрушение пласта с помощью гидравлического разрыва. При этом низкая проницаемость и насыщенность пласта вынуждает разрушать пласт многократно.

Ключевые слова: история изучения газоносных сланцев; происхождение сланцевого газа; ресурсный потенциал сланцев в мире; уникальные особенности газоносных сланцев; особенности залегания и миграции сланцевого газа; особенности геологического строения баженовской свиты; современный опыт разработки баженовской свиты.

Kochergin Maxim Alexandrovich

Masters' student,
Institute of Oil, Gas and Energy,
Kuban state technological university
kochergin.m13@gmail.com

Annotation. The XXI century has long been predicted as the century of exhausting the bulk of traditional fossil fuel reserves and it is time to develop unconventional hydrocarbon resources. Unconventional hydrocarbon resources mean that part of the oil and gas resources, the preparation and development of which require the development of new methods and methods of identification, exploration, extraction, processing and transport. The main non-traditional resources of natural gas are shale gas, coal bed methane, gas in dense sandstones, etc. Thanks to the progress in development and operation technologies, these previously unrecoverable reserves are now recoverable. The extraction of hydrocarbons from shale deposits has specific features. Due to the high density and strength of the shale for the release of oil and gas from the pore space, practically the only method is the fracture of the formation by hydraulic fracturing. At the same time, low permeability and saturation of the layer forces the formation to break many times.

Keywords: history of the study of gas-bearing shales; origin of shale gas; resource potential of shale in the world; unique features of gas-bearing shales; features of occurrence and migration of shale gas; features of the geological structure of the Bazhenov formation; modern experience in the development of the Bazhenov formation.

История изучения газоносных сланцев

О содержании в широко распространённых по всему миру сланцевых породах известно давно, однако до недавнего времени разработка большинства из них считалась нерентабельной. В 1976 году Моргантауновский центр энергетических исследований США (лаборатория государственного Бюро горного дела) начал Восточный проект сланцевого газа. Задачей проекта было изучить возможности извлечения газа из сланцев и других нетрадиционных источников с целью ослабления нефтяной зависимости страны. В проекте приняли участие такие гиганты американской науки, как национальные лаборатории в Лос-Аламосе, Ливерморе, Лоуренсовская и Сандийская лаборатории, а также многие университеты и частные компании.

Министерство энергетики США совместно с другими федеральными агентствами как на уровне штатов, так и на уровне всей страны, в течение 30 лет щедро финансировало отработку технологии. Именно с её помощью в 1977 году в Колорадо впервые был произведён массовый гидроразрыв пласта для извлечения газа. Помимо прямых инвестиций в размере 100 млн долларов в 1970–1980-х годах, министерство методически способствовало развитию технологий, которые обеспечили сегодняшний уровень производства сланцевого газа. Отцом сланцевой революции по праву считают Джорджа Митчелла, который сделал принципиальное для разработки газоносных сланцев открытие, соединив технологии многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП) и горизонтального бурения. Основными направлениями финансирования при этом бы-

ли сама по себе технология горизонтального бурения, совершенствование буровой техники, использование многозонального гидроразрыва пласта (ГРП) и реагентов на водной основе, снижающих поверхностное натяжение, а также создание методик для построения трёхмерных карт на основании микросейсмических данных.

Экспериментальными исследованиями газоносных сланцев, совершенствованием технологий разработки и эксплуатации, численным моделированием и прогнозированием показателей разработки газоносных сланцев занимались многие крупные учёные. К основным вкладам этих учёных в области разработки газоносных сланцев можно отнести:

- выявлены уникальные особенности газоносных сланцев и особенности залегаания и миграции газа в сланцах;
- созданы модели для расчёта кажущейся проницаемости газоносных сланцев и подсчёта запасов сланцевого газа;
- разработаны модели фильтрации вблизи трещины ГРП методом конечных элементов;
- выявлены факторы, влияющие на разрываемость газоносных сланцев;
- разработаны различные математические и гидродинамические модели для описания сланцев и прогнозирования показателей разработки;
- выявлены закономерности влияния некоторых геолого-промысловых факторов на продуктивность газоносных сланцев;
- разработаны методики оценки характеристик месторождений и прогноза добычи и др.

В 1986 году впервые и опять же за государственный счёт был произведён успешный множественный гидроразрыв пласта. Даже сами американские энергетики отмечают, что без официальной поддержки правительства и вложений бюджетных средств этой технологии не было бы вообще, и не было бы сейчас на рынке США газа из сланцев. А чтобы активизировать работу по разработке сланцевых месторождений, были розданы десятки тысяч акров федеральных земель, введены налоговые льготы для фирм и компаний-разработчиков. Так, в соответствии со Статьей 29 Закона США о налогообложении сверхприбыли сырой нефти «Нетрадиционные виды топлива» производители газа из нетрадиционных источников с 1980 по 2002 г. получали льготы в размере около 18 долл./тыс. м³. За этот период добыча нетрадиционного газа выросла в четыре раза.

Всё это сделало добычу сланцевого газа в США привлекательным бизнесом. Сегодня добычей сланцевого газа занимается настолько много компаний, что даже в Америке никто не может назвать их точное количество. Они добывают газ из сланцев на значительной части территории США. Благодаря прогрессу в технологиях разработки и содействию в экономическом плане со стороны государства, производство сланцевого газа в США резко увеличивалось в последние годы (рис. 1). В 2014 году годовая добыча сланцевого газа в США достигла 381 млрд. м³, данная цифра в 100 раз больше годового производства сланцевого газа в 2007 году.



Рисунок 1 – Производство сланцевого газа в США (1979–2014 гг.)

Происхождение сланцевого газа

Под «сланцевым газом» понимается природный газ, диспергированный в низкопроницаемых горючих сланцах, т.е. газ, генерированный на соответствующих этапах преобразования органического вещества.

Газ, выделяемый из богатых органическим веществом сланцев, может быть биогенного и термогенного происхождения, а также смешанного или гибридного происхождения. Это зависит в основном от термической зрелости органического вещества сланцев. Термогенный газ генерируется из зрелых сланцев термогенным способом, т.е. при расщеплении (крекинге) органического вещества или вторичном крекинге (расщеплении) нефти; а биогенный газ выделяется из менее зрелых сланцев в результате биологического разложения (рис. 2).

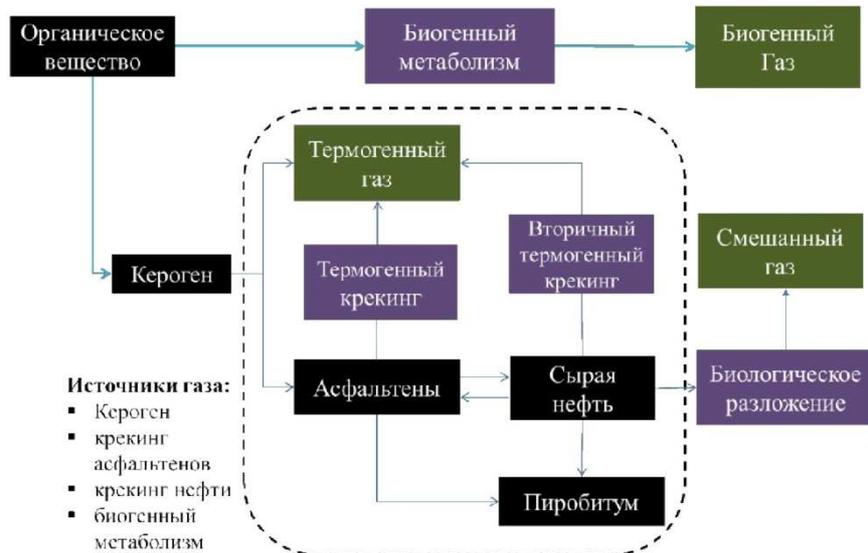


Рисунок 2 – Схематическая диаграмма происхождения сланцевого газа

Термическая зрелость органического вещества напрямую влияет на газоносность сланцев. Чем выше степень термической зрелости, тем благоприятнее для газового накопления и сбора. При прочих равных условиях более зрелое органическое вещество способно генерировать больше геологических ресурсов углеводородов, чем менее зрелое органическое вещество.

В результате дебит скважин, пробуренных в термогенных сланцах с высокой зрелостью, всегда выше дебита скважин, пробуренных в термогенных сланцах с низкой зрелостью или в биогенных сланцах.

Ресурсный потенциал сланцевого газа и нефти в мире

До настоящего времени достоверные и общепризнанные данные о мировых геологических ресурсах и разведанных запасах сланцевого газа и нефти отсутствуют, но по всемирным оценкам ресурсы сланцевого газа и нефти в недрах земли огромны.

По состоянию на конец 2013 года, международное энергетическое агентство (МЭА) произвело оценку ресурсов технически извлекаемых нетрадиционных запасов УВ в мире, включая сланцевый газ и нефть (рис. 3; табл. 1 и 2).

Нетрадиционные ресурсы углеводородов содержатся в коллекторах нетрадиционного геологического строения, наиболее яркими их представителями являются баженовская свита России, месторождения Баккен, Барнетт в США и другие сланцевые залежи мира.

Если же для коллекторов трудноизвлекаемых запасов, в том числе и для низкопроницаемых, структурный фактор играет значительную роль в формировании залежи, то для коллекторов нетрадиционных запасов он не важен. Главный фактор в этом случае – наличие нефтегазоматеринских глинистых пород, способных генерировать углеводороды из органического вещества (керогена). Данные породы выступают флюидопором для уже преобразованных битума, нефти и газа в региональном масштабе.

СПУСТЯ 20 ЛЕТ ПОСЛЕ ТОГО КАК ТЕХАСКИЙ НЕФТЕГАЗО-РАЗВЕДЧИК ДЖОРДЖ МИТЧЕЛЛ ПРОИЗВЕЛ ГИДРОРАЗРЫВ СЛАНЦЕВЫХ ПЛАСТОВ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПАНИИ СОРЕВНУЮТСЯ ЗА ДОСТУП К СЛАНЦЕВЫМ ЗАПАСАМ ПО ВСЕМУ МИРУ

ТОП запасов сланц. нефти* (млрд. баррелей)			ТОП запасов сланц. газа* (трлн. куб. футов)		
1	Россия	75	1	Китай	1,115
2	США	58	2	Аргентина	802
3	Китай	32	3	Алжир	707
4	Аргентина	27	4	США	665
5	Ливия	26	5	Канада	573

■ СЛАНЦЕВЫЕ ФОРМАЦИИ, СОДЕРЖАЩИЕ НЕФТЬ И ГАЗ, ПО СОСТОЯНИЮ НА МАЙ 2013

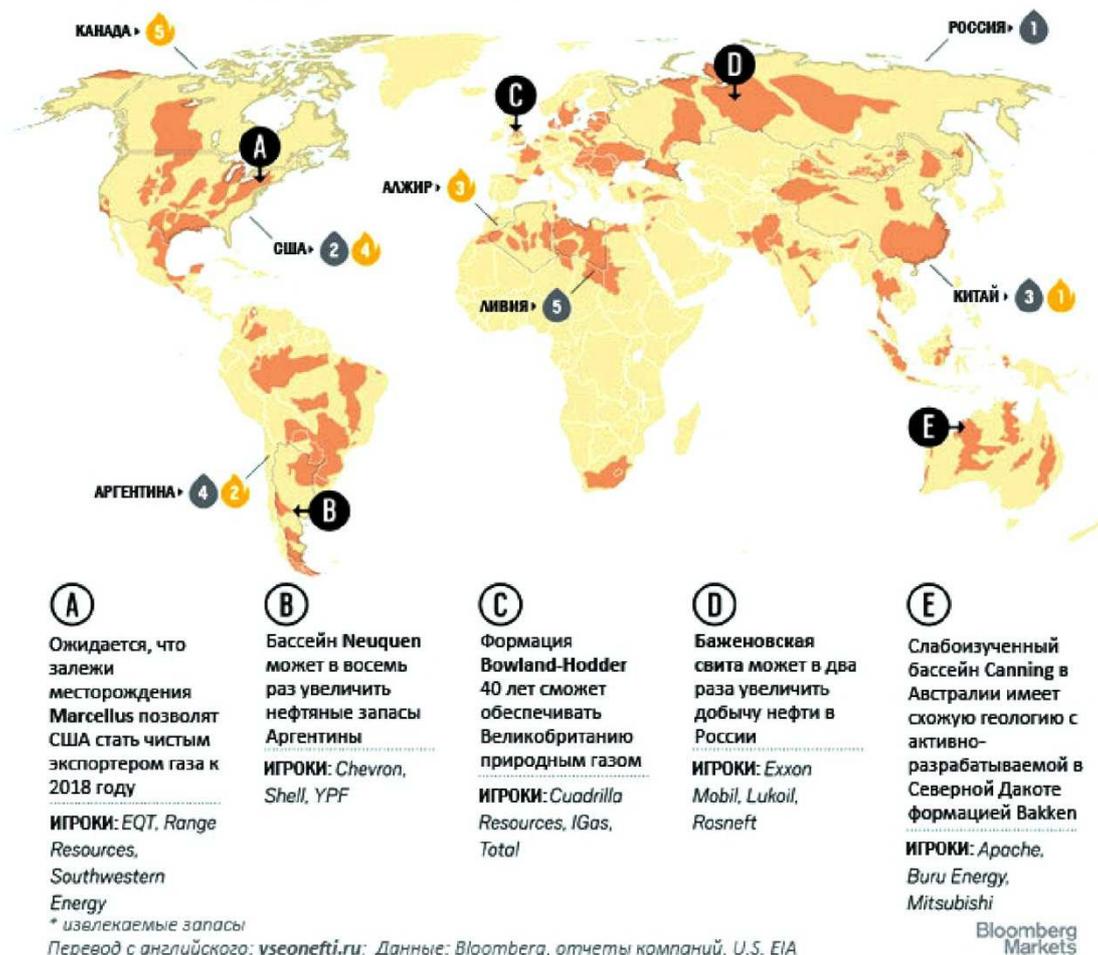


Рисунок 3 – Распределение сланцевых запасов

Таблица 1 – Распределение запасов сланцевого газа

Страна	Запасы сланцевого газа, млрд м ³	% к общему объёму
Китай	30 105	15 %
Аргентина	21 654	11 %
Алжир	19 089	10 %
США	17 955	9 %
Канада	15 471	8 %
Мексика	14 715	7 %
Австралия	11 799	6 %
ЮАР	10 530	5 %
Россия	7 695	4 %
Бразилия	6 615	3 %
Остальной мир	41 445	21 %
Весь мир	197 073	100 %

Таблица 2 – Распределение запасов сланцевой нефти

Страна	Запасы сланцевой нефти, млн тонн	% к общему объёму
Россия	10 230	22 %
США	7911	17 %
Китай	4365	9 %
Аргентина	3683	8 %
Ливия	3546	8 %
Венесуэла	1773	4 %
Мексика	1773	4 %
Пакистан	1228	3 %
Канада	1228	3 %
Индонезия	1091	2 %
Остальной мир	10 230	22 %
Весь мир	47 058	100 %

Однако неоднократно были зарегистрированы случаи миграции нефти в выше- и нижезалегающие низкопроницаемые пласты более традиционных геологических строений (ачимовская, абалакская, тюменская и другие свиты) по структурным нарушениям. Эти нарушения, скорее всего, являются результатом неотектонических процессов. Если рассматривать пустотное пространство, то в случае с низкопроницаемыми залежами оно по большей части представлено поровым объёмом с высокой открытой ёмкостью, а у нетрадиционных – это целая смесь, начиная от трещин и заканчивая нанопустотами с неравномерным распределением эффективного ёмкостного пространства. Всё это очень сильно осложняет понимание и возможность оценки гидродинамических параметров залежи. Поэтому оценить начальные геологические запасы по общепринятым методам не представляется возможным. Необходимо дополнительно учитывать условия осадконакопления, процент и степень зрелости органического вещества, а также другие характеристики, степень влияния которых пока плохо изучена. Если говорить о подсчёте начальных извлекаемых запасов, то здесь также необходим абсолютно иной подход, учитывающий степень тектонических деформаций, степень естественной трещиноватости, наличие подвижных углеводородов, геомеханические свойства и пр. Дополнительно к отличиям между рассматриваемыми типами коллекторов можно отнести возможность искусственной генерации углеводородов из керогена, наличие которого в низкопроницаемых коллекторах никогда не наблюдалось.

Большое количество дискуссий в последние годы было посвящено вопросу наличия аналогов баженовской свиты в мире. В первую очередь её пытались сравнивать с американскими сланцевыми месторождениями. Сравнив баженовскую свиту с несколькими сланцевыми месторождениями США (Баккен, Барнетт, Маркеллус, Вудфорд) по ряду параметров (возраст, тектонический тип бассейна, литологии, термальная зрелость керогена, пористость и др.), можно сделать выводы, что аналогов нет.

Итак, строение нетрадиционных коллекторов баженовской свиты отличается от низкопроницаемых коллекторов трудноизвлекаемых запасов, также баженовская свита не является прямым аналогом североамериканских сланцев. Несмотря на это, необходимо учитывать опыт разработки низкопроницаемых коллекторов, вытекающий из особенностей их геологического строения, поскольку и для баженовской свиты характерна низкая проницаемость продуктивных интервалов.

Уникальные особенности газоносных сланцев

Сланцы – плотно упакованные, тонкозернистые, обломочные осадочные породы, обладающие средним размером зерна менее 0,0625 мм. Эти породы практически непроницаемы для газа и имеют плитчатую структуру. Таким образом, сланцевый газ не может скапливаться в больших объёмах, он заперт в микротрещинах пород с очень низкими фильтрационными свойствами в отличие от традиционного природного газа.

В отличие от обычных глинистых сланцев, горючие сланцы содержат органическое вещество – кероген, похожий на уголь. Содержание и зрелость керогена являются

качественными показателями сланцев. К наиболее термически зрелым сланцам относят отложения «сухого газа» с керогеном типа III; менее термически зрелые сланцы относятся ко II типу (при добыче газ поступает с примесями конденсата). Менее зрелые сланцы с керогеном типа I являются нефтеносными, т.е. содержащими нефть в сланцевых отложениях. С учётом критериев термической зрелости большинство объектов поисково-разведочных работ на сланцевый газ сосредоточено в отложениях, чей геологический возраст начинается от ордовика и заканчивается концом пенсильванского периода (верхнего карбона).

Сланцевые толщи сильно отличаются от традиционных коллекторов нефти и газа, они обладают уникальными стратиграфическими характеристиками и фильтрационными свойствами. К существенным отличиям относятся:

- сланцы выступают одновременно и материнской породой, в которой происходит образование газа, и породой-коллектором, являющейся резервуаром для сланцевого газа;
- сланцы состоят из ультрасплошной матрицы и системы естественных трещин (матрица сланцев представляет собой плотные осадочные породы и имеет низкие фильтрационно-емкостные свойства, газ почти не может мигрировать внутри матрицы; естественные трещины являются главными каналами миграции газа);
- пути залегания газа в сланцах также разнообразны и сложны;
- наноразмерная поровая структура (в газоносных сланцах широко развиты наноразмерные поры; особенная поровая структура предопределяет особенность фильтрации газа в сланцевых поровых пространствах) (рис. 4).

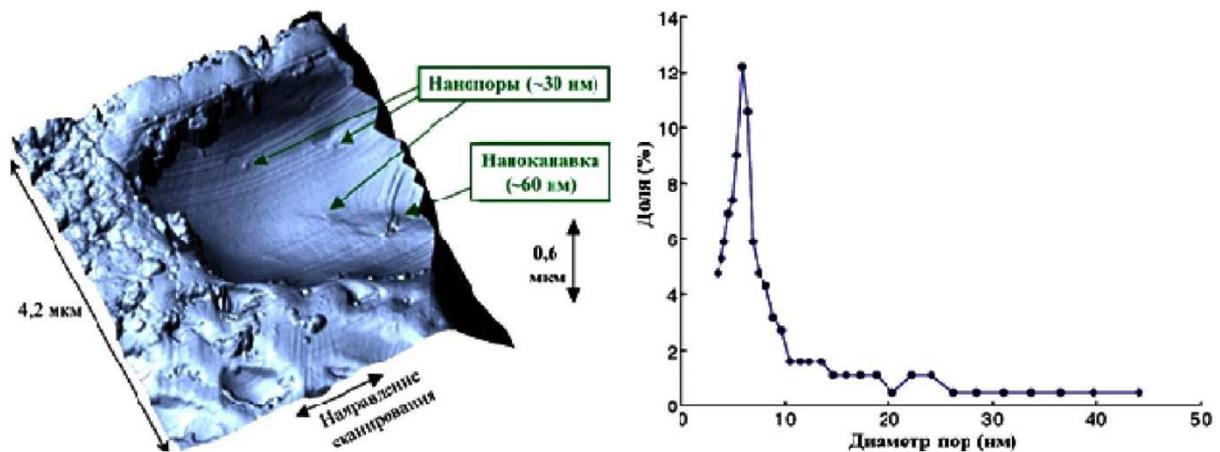


Рисунок 4 – Наноразмерные поры в сланцах и распределение размеров пор в сланцах Барнетт

Особенности залегания и миграции сланцевого газа в сланцевых толщах

Приток газа в плотных сланцевых толщах представляет собой многоплановый процесс, включающий десорбцию, диффузию и фильтрацию, не подчиняющуюся закону Дарси. И, соответственно, при освоении ресурсов сланцевого газа, как правило, работают четыре механизма (этапа) добычи (рис. 5):

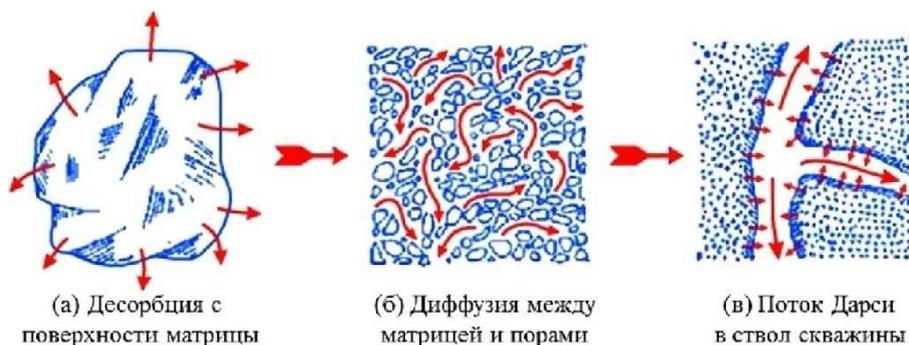


Рисунок 5 – Механизм формирования притока сланцевого газа

1. Приток свободного газа (извлечение свободного газа приводит к снижению пластового давления, вследствие чего адсорбированный газ начинает десорбировать).
2. Приток газа за счёт десорбции (рис. 5 а).
3. Приток газа за счёт диффузии (рис. 5 б).
4. Фильтрация газа из трещин в скважину (рис. 5 в).

Особенности геологического строения нетрадиционных коллекторов баженовской свиты

Вопреки тому, что отложения баженовской свиты с 60-х годов прошлого века рассматривались только как нефтегазоматеринские породы и к породам-коллекторам не относились и даже рассматривались как флюидоупор нефтегазонасыщенных комплексов, их продуктивность установлена на многих месторождениях. В настоящее время такие породы относят к нетрадиционным трещинным коллекторам, которые распространены не только в Западной Сибири в виде баженовской свиты и её аналогов, но и широко известны в других нефтегазоносных бассейнах.

Несмотря на полученные многочисленные притоки нефти из отложений баженовской свиты, освоение этого уникального объекта находится на начальной стадии. До сих пор плохо изучены закономерности распространения залежей и их строение. Кроме того, отсутствуют надёжные методы опробования пласта, что в ряде случаев приводит к отрицательному результату при испытании нефтенасыщенных участков свиты.

Оценкой перспектив поиска и разработки нетрадиционных породколлекторов в баженовской свите специалисты начали заниматься ещё в начале 80-х годов. В настоящее время интерес к баженовской свите только продолжает расти.

Впервые баженовскую свиту выделил Гурари Ф.Г. и заключил её в состав марьяновской свиты, высказав предположение о возможной насыщенности свиты нефтью. Также изначально считалось, что литология и разрез свиты характеризуются своей однородностью, но в наше время выделяют баженовскую, тутлеймскую и мулымьинскую свиты. Эти три свиты имеют некоторые отличия между собой по литологии и стратиграфии.

Битуминозные преимущественно глинистые отложения баженовской свиты и её аналоги занимают внутреннюю депрессионную зону Западно-Сибирской плиты и распространены на территории более 1 млн км² (рис. 6).

Кровля отложений баженовской свиты вскрыта на глубинах от 2100 до 3400 м. Глубина залегания кровли увеличивается к осевой зоне Мансийской синеклизы и на севере Западно-Сибирской плиты. Наиболее резкое изменение глубин от 2400 до 2700 м происходит в западной и северной частях Нижневартовского свода.

Мощность отложений баженовской свиты на большей части площади её распространения довольно стабильна и изменяется от 15 до 30 м. Увеличение мощности до 50–95 м отмечается на севере плиты в пределах Надымской и Танловской впадин и западного борта Уренгойско-Пуровского желоба. Наименьшие мощности (до 5 м) наблюдаются на отдельных локальных поднятиях Сургутского, Нижневартовского, Каймысовского сводов, Александровского и Демьянского мегавалов. Можно встретить и наличие аномальных разрезов (до 110 м), например, в разрезе Северо-Конитловского месторождения. Появление таких высоких значений толщин баженовской свиты в литературе, скорее всего, вызваны условностью проведения её границ из-за нечёткого контакта с другими глинистыми свитами (мегионская, ачимовская и др.).

До недавнего времени считалось, что не существует методов прогнозирования коллекторов в баженовских отложениях. На сегодняшний день всё больше авторов в своих публикациях сообщают об определённых успехах в этом направлении. Так, например, появились публикации, посвящённые изучению строения и нефтегазоносности пограничных отложений мела и юры Юганского Приобья, в которых появление резервуара в баженовской свите объясняется наличием ограничивающих её сверху абалакскими аргиллитами, а снизу подачимовскими отложениями. Делаются выводы про экраны из нефтематеринских пород и показывается возможность формирования как простых структурных ловушек, так и сложных тектонически и литологически экранированных в ачимовско-баженовском комплексе (рис. 7). При анализе керна песчано-алевролитовых пластов отмечается наличие зон трещиноватости, дробление отдель-

ных слоёв, инъекционное продавливание одного типа пород в другой, но в тоже время радиоактивные битуминозные глины имеют выдержанную тонкослоистую структуру вне аномального разреза. Нефтенасыщенные эффективные толщины составляют от 8,4 до 18,2 м, проницаемость – $(0,5-40) \cdot 10^{-3}$ мкм², пористость – 14,8–18,8 % по данным геофизических исследований скважин.

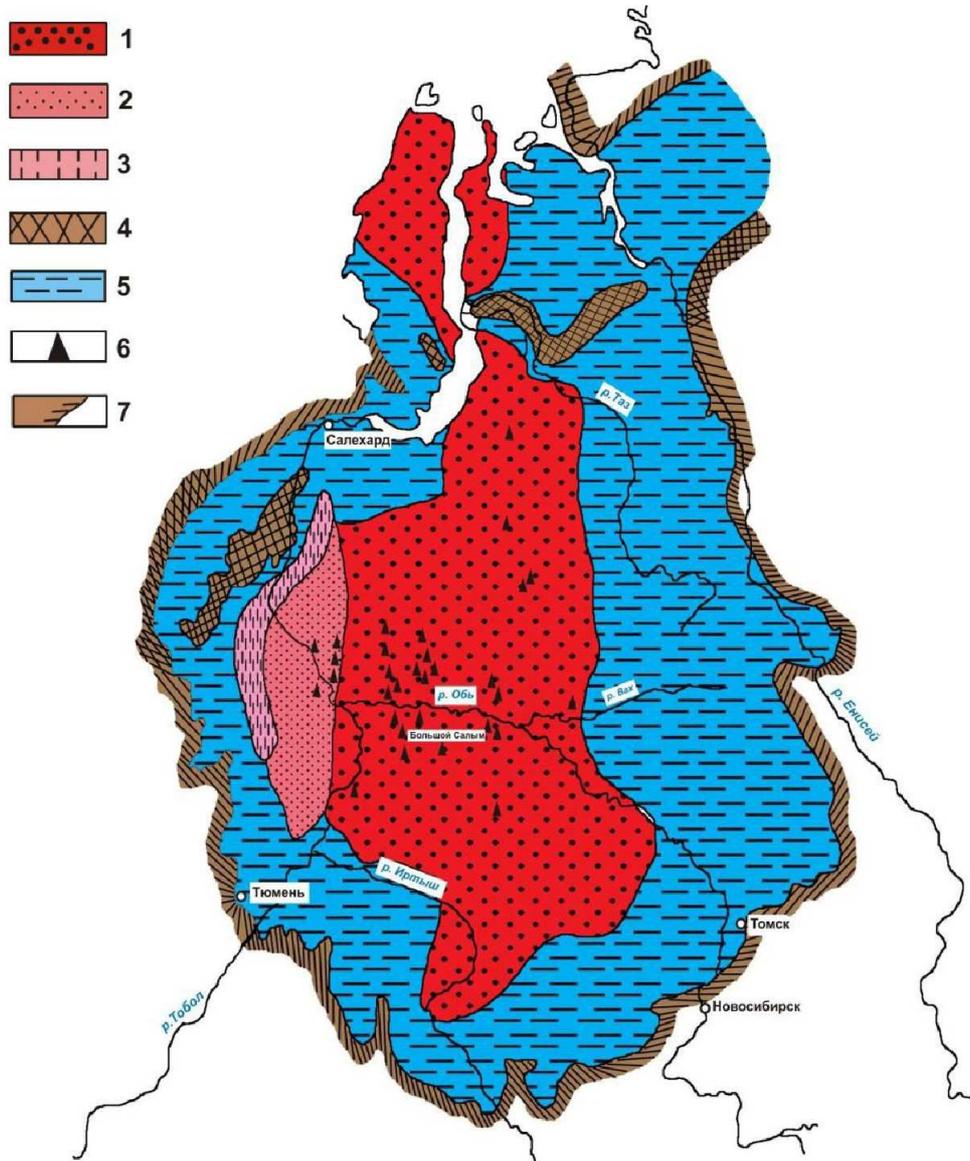


Рисунок 6 – Распространение битуминозных глинистых пород в Западной Сибири:
 1 – баженовская свита; 2 – тутлеймская свита; 3 – шаимская и игримская свиты;
 4 – участки отсутствия титон-нижнеготеривских отложений;
 5 – сероцветные аналоги титон-нижнеготеривских пород;
 6 – основные залежи нефти в битуминозных породах;
 7 – граница Западно-Сибирской мезо-кайнозойской нефтегазоносной провинции

Опираясь на многолетний накопленный опыт и подключая современные приборы и технологии для исследования в скважинах и изучения керна, геологи довольно точно выделяют ловушки УВ в сложнопостроенных залежах баженовской свиты. Однако не все из них оказываются продуктивными в промышленных масштабах, по-прежнему остаётся открытым вопрос оценки характера нефтеносности. Существует мнение, что виной низкому или отсутствующему дебиту является отсутствие качественных технологий вскрытия пласта.

На основе обширного количества лабораторных анализов специалисты МГУ выявили вторичные коллектора в пласте Ю₀ (порово-микрокавернозные, микропоро-

вые и трещино-каверновые) со следующими литотипами: кремнисто-глинистые породы, карбонатные породы «корреляционного слоя», глинистые силициты, силициты, карбонатно-кремнистые и кремнисто-карбонатные низкоглинистые породы, апорадиоляриевые карбонаты, карбонатно-глинистые силициты с переменным содержанием компонентов, кероген-кремнисто-глинистые породы.

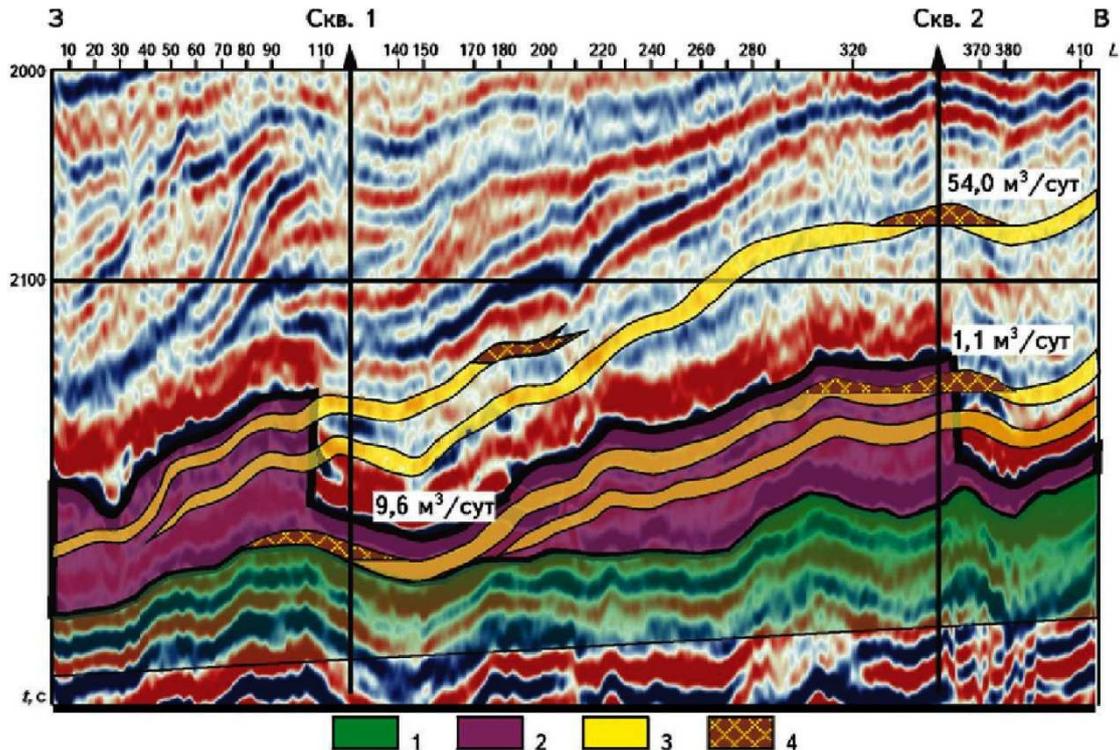


Рисунок 7 – Обобщённая закономерность распределения залежей нефти в ачимовско-баженовском комплексе отложений:
 1 – георгиевская и васюганская свиты; 2 – зона развития баженовской свиты;
 3 – ачимовские пласты; 4 – залежи нефти

Петрографические анализы керн показывают, что баженовской свите характерны следующие основные компоненты с количественным соотношением между ними: сапропелевое органическое вещество (22,5 %), глинистый (29,5 %) и алевролитовый материал (5 %), аутигенный, преимущественно органогенный кремнезём (29,5 %), доломит (7,5 %), кальцит (3,5 %) и пирит (2,5 %).

В результате анализа данных литологического состава баженовской свиты выделяются четыре основных литотипа, характеризующие баженовскую свиту:

1. Глинисто-кремнистые породы, обогащённые органическим веществом (ОВ), – слагают основную часть баженовской свиты (около 65 %). Тонкослоистые породы, сложенные биогенным кремнезёмом (до 50 %), глинами (до 30 %), остатками организмов с карбонатным скелетом (до 10 %): пористость пород колеблется в пределах от 6 до 8 %, а значения проницаемости составляют менее 0,01 мД.

2. Карбонатно-кремнистые породы, также обогащённые ОВ, – составляют около 15 % баженовской свиты. Это тонкослоистые породы, сложенные биогенным кремнезёмом (до 30 %), остатками кокколитофорид (до 25 %) и глинами (до 10 %). Породы этого литотипа характеризуются теми же значениями пористости и проницаемости, что и предыдущие.

3. Радиоляриты – составляют около 15 % баженовской свиты. Породы, сложенные остатками радиолярий (до 90 %), с незначительной примесью глин (до 5 %). Породы могут быть по составу кремнистыми или замещёнными кальцитом и доломитом. Радиоляриты характеризуются наибольшими значениями пористости (до 15 %) и проницаемости (может быть больше 1–5 мД) в объёме баженовской свиты.

4. Доломиты – составляют не более 5 % баженовской свиты. Породы, сложенные перекристаллизованным доломитом. В изученных скважинах пористость пород составляет до 6 %, проницаемость – менее 0,01 мД.

Следует отметить, что карбонатные породы, обладающие каверновой ёмкостью, тяготеют к подошвенной части (зона контакта с абалаком), кремнистые разности чаще всего встречаются в средней части баженовской свиты. Распределение остальных типов коллекторов по разрезу менее закономерно. В кровле свиты преобладает глинистая составляющая с увеличенным содержанием органического вещества (керогена).

Анализ связи распределения продуктивности с литолого-фациальной зональностью баженовской свиты показывает вторичность этого фактора в локальном плане, поскольку выделенные фациальные зоны имеют значительно большие площади, чем намечающиеся участки высокой продуктивности. Как правило, наиболее высокие дебиты отмечаются в скважинах, расположенных в зонах развития карбонатных пород, что связано, по-видимому, с развитием кавернозных коллекторов. С другой стороны, участки с повышенным содержанием в породах органического вещества, коррелирующие с их естественной радиоактивностью, менее продуктивны, что определяется, вероятно, повышенной пластичностью пород и их меньшей подверженностью к формированию трещинной ёмкости.

Таким образом, ключевым моментом в изучении отложений баженовской свиты является комплексный подход к исследованиям, при котором результаты, полученные разными методами, увязываются между собой и выстраиваются в единую картину, отражающую различные свойства объекта. Это позволяет достоверно и обоснованно разделить разрез толщи на продуктивные и непродуктивные отложения, локализовать коллекторы в разрезе, выявить отличия свойств коллекторов от неколлекторов. Эта информация необходима при постановке задачи для проведения сейсмического прогноза свойств свиты в межскважинном пространстве. Чем представлен коллектор в отложениях баженовской свиты и каков его генезис – до сих пор является дискуссионным вопросом. Отчасти это связано с тем, что баженовская свита на территории Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна неоднородна, её состав и строение меняются в зависимости от условий осадконакопления и произошедших в толще постседиментационных преобразований, свой отпечаток накладывает также история тектонического развития территории, наличие тепловых аномалий и многое другое. Поэтому в каждом районе и на каждом месторождении очень важно выявлять индивидуальные особенности отложений баженовской свиты. Ведь именно от литологического состава и генезиса коллектора, его отличий от вмещающих пород зависит выбор методики и направленности геологоразведочных работ, а позднее – и разработки залежей углеводородов.

Современный опыт разработки баженовской свиты

На сегодняшний день в опытно-промышленной эксплуатации баженовской свиты участвует всего несколько отечественных компаний, в их число входят «Роснефть», «Сургутнефтегаз», «Лукойл» и «Газпром нефть», как в совместных проектах («Салым Петролеум Девелопмент Н.В. (СПД)»), так и в своих собственных.

Одной из основных причин, из-за которой многие компании отказываются от разработки баженовской свиты, является получение нестабильных притоков нефти в промышленных масштабах. Сомнения специалистов небезосновательны – по результатам бурения на Салымском месторождении ещё в советские времена около 30 % скважин баженовской свиты оказались «сухими». Постепенно выявилась и главная проблема – низкий КИН. В настоящее время для пласта Ю₀ баженовской свиты Салымского месторождения он составляет около 7 %. Что касается других компаний, то в компании «Сургутнефтегаз» на протяжении 30 лет было пробурено более 600 скважин, вскрывших баженовскую свиту. По результатам работ притоки нефти получены только в 63 % скважин (максимальные объёмы составляли до 300 тонн в сутки). По данным на май 2011 года, из баженовской свиты компания добыла свыше 1,2 млн тонн нефти, а за всё время эксплуатации планируется добыть более 5 млн. тонн.

Поскольку так и не найдено эффективной технологии вскрытия баженовских пластов, компании продолжают делать попытки в поиске таковой. Одним из примеров могут служить данные по Ульяновскому месторождению, которое разрабатывает компания «Сургутнефтегаз». По представленным материалам в открытом доступе на месторождении пробурено 6 скважин на объект Ю₀, из них 5 добывающих с горизонталь-

ным стволом и открытым забоем, 1 – поисковая. Пласт вскрывался с использованием биополимерного бурового раствора на минимальной репрессии. Из-за несовершенства выбранной технологии с использованием установки «непрерывная труба» полностью вскрыть залежь удалось только двумя скважинами. Это было не единственной проблемой, вскоре во время эксплуатации незакрепленные части горизонтальных стволов обрушились. Проведение операции ГРП в обрушенных стволах не дало никакого эффекта, а в обсаженных щелевым фильтром оказалось малоэффективным. Лучшую эффективность показали операции по углублению, ответвлению и бурению новых горизонтальных стволов, но и в них произошло обрушение ствола.

Обрушение пород в горизонтальных скважинах с открытым забоем также отмечается на Западно-Сахалинском месторождении. С целью повышения эффективности работы на этих скважинах пробурены наклонно-направленные боковые стволы. Также на данном объекте присутствуют ГС с использованием щелевых хвостовиков на забое и наклонная скважина с протяжённостью ствола порядка 70 метров по продуктивному пласту. Во всех скважинах проведены операции по гидравлическому разрыву пласта. Данное мероприятие не отличается высокой эффективностью. Только лишь в одной скважине получен высокий дебит (112 тонн/сут.), который вызван попаданием в высокопродуктивную зону с развитой системой естественных трещин. В первый год работы всех скважин дебит снижался на 10–50 %.

Наибольшее количество накопленной добычи (около 1,4 млн тонн) из Западно-Сибирских месторождений, на которых ведётся разработка баженовской свиты компанией «Сургутнефтегаз», приходится на Ай-Пимское. Добыча нефти ведётся с использованием горизонтальных скважин, многозабойных горизонтальных и наклонно-направленных скважин. Как и в случае с предыдущими двумя месторождениями, анализ разработки показывает, что получение высоких дебитов на некоторых скважинах связано не с технологией вскрытия, а с попаданием в высокопродуктивные зоны с развитой сетью трещин и наличием АВПД. Отмечается, что специалисты компании считают перспективными направлениями в разработке баженовской свиты технологии:

- 1) прогноза каверно-трещинных зон;
- 2) заложения скважин в условиях аномально высоких пластовых давлений и слабосцементированных участков продуктивных интервалов;
- 3) освоения и интенсификации притока нефти;
- 4) создания регулируемого образования обширной сети трещин;
- 5) ГРП с исключением выхода трещин за пределы пласта и кольматации природных трещин рабочим агентом.

Дочернее предприятие компании «Лукойл» активно занимается опытно-промышленной разработкой баженовской свиты на Средне-Назымском месторождении с 2007 года. С этого же года скважины стали эксплуатировать с применением электроцентробежных насосов. Накопленная добыча за 2012 год на месторождении составила 56,9 тыс. тонн нефти. Причём 35,7 % из них было добыто за счёт применения мероприятий по повышению нефтеотдачи пластов (ПНП) и интенсификации добычи нефти (ИДН). Также на месторождении тестируется термогазовый способ разработки залежей баженовской свиты.

«Классический» подход к разработке низкопроницаемых коллекторов заключался в повышении эффективности систем заводнения с использованием наклонно-направленных скважин. Данный вариант разработки не может быть реализован на баженовской свите, т.к. вскрывающие её скважины характеризуются отсутствием гидродинамической связи между собой. Тем не менее, из описанного опыта разработки интерес представляют горизонтальные скважины, гидроразрыв продуктивного пласта и применение системных обработок призабойной зоны пласта.

Исходя из анализа опыта разработки баженовской свиты, можно сделать вывод, что на сегодняшний день пробурено большое количество скважин, но по-прежнему остаются открытыми вопросы, касающиеся оптимальной конструкции скважин, технологий вскрытия и освоения пласта.

Современные тенденции заключаются в переходе к совершенно новым системам разработки с использованием горизонтальных скважин и гидравлического разрыва

пласта, комбинировании и последовательном применении нескольких технологий, направленных на повышение продуктивности нефтеотдающих пластов. Перспективным направлением являются предварительные обработки призабойной зоны пласта с целью повышения эффективности технологий интенсификации притока нефти из низкопроницаемых зон в уже пробуренных скважинах.

Литература:

1. Арутюнов Т.В., Поздняк А.Н., Савенок О.В. Перспективы разработки сланцевой нефти на примере пласта ЮС₀ Салымского месторождения / Материалы VII Всероссийской конференции: «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (28–31 октября 2014 года). – Пермь : Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2014. – С. 203–206.
2. Арутюнов Т.В. Антониади Д.Г., Савенок О.В. Анализ методов и технологий промышленной разработки месторождений углеводородов сланцевых отложений // Научный журнал Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник), 2014. – № 3. – С. 43–47.
3. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Состояние, тенденции и перспективы выработки запасов углеводородов из сланцевых отложений // Научный журнал Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник), 2014. – № 4. – С. 39–51.
4. Арутюнов Т.В., Арутюнов А.А., Савенок О.В. Особенности разработки Салымского нефтяного месторождения (на примере пласта ЮС₀) / Материалы II Всероссийской научно-практической конференции: «Фундаментальные и прикладные исследования в России: проблемы и перспективы развития» (19 января 2015 года). – Ростов-на-Дону : Профпресс, 2015. – С. 40–52.
5. Арутюнов Т.В., Арутюнов А.А., Савенок О.В. Перспективы разработки месторождений сланцевых отложений / сборник статей Международной научно-практической конференции: «Фундаментальные проблемы науки» (23 января 2015 года). – Уфа : РИО МЦИИ ОМЕГА САИНС, 2015. – С. 126–135.
6. Арутюнов Т.В., Арутюнов А.А., Савенок О.В., Моллаев З.Х. Методология оценки ресурсов сланцевых отложений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 3. – С. 266–271.
7. Арутюнов Т.В., Арутюнов А.А., Савенок О.В. Постановка задачи физико-химического моделирования сланцевых пород // Инженер-нефтяник. – 2015. – № 1. – С. 42–47.
8. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Исследование сланцевых пород и природы сланцевой нефтеносности баженовской свиты и формации Баккен // Научный журнал Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник), 2015. – № 1. – С. 28–46.
9. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Особенности строения месторождений сланцевых отложений / Труды XIX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвящённого 70-летию юбилею Победы советского народа над фашистской Германией: «Проблемы геологии и освоения недр» (6–10 апреля 2015 года). – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – Т. II. – С. 385–387.
10. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Анализ характеристик геологического строения и коллекторских свойств сланцевых отложений // Нефть. Газ. Новации. – 2015. – № 4. – С. 72–76.
11. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Принципы моделирования поровой структуры сланцевых пород / XIII Международная научно-практическая конференция: «Современные концепции научных исследований» (Россия, г. Москва, 29–30 апреля 2015 года) // Ежемесячный научный журнал № 4 (13) / 2015. – Москва : Евразийский союз учёных, 2015. – Ч. 11. – С. 103–109.
12. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Жизненный цикл инновационного продукта – сланцевого газа / материалы Всероссийской с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: «Новые технологии – нефтегазовому региону» (19–20 мая 2015 года). – Тюмень : ТюмГНГУ, 2015. – Т. 1. – С. 49–52.
13. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Prospettive di shale gas Russa // Italian Science Review. 2015; 5(26). PP. 138–145. – URL : <http://www.ias-journal.org/archive/2015/may/Arutyunov.pdf>
14. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Моделирование глинистых пород с колломорфным кремнезёмом // Инженер-нефтяник. – 2015. – № 2. – С. 18–21.
15. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Оценка параметров порового пространства глинистых пород с целью моделирования поровой структуры сланцевых отложений // Материалы X Международного симпозиума, посвящённого 70-летию Победы: «Фундаментальные и прикладные проблемы науки». – М. : РАН, 2015. – Т. 2. – С. 88–100.
16. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Экологические проблемы при разработке месторождений сланцевых углеводородов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2015. – № 9. – С. 39–42.

17. Арутюнов Т.В., Савенок О.В., Кошелев А.Т. Разработка методологии приготовления образцов глинисто-кремнистых пород с учётом факторов неоднородности и неопределённости // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2015. – № 10. – С. 25–28.
18. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Технология добычи сланцевого газа и влияние на экологию / Труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвящённого 120-летию со дня основания Томского политехнического университета: «Проблемы геологии и освоения недр» (4–8 апреля 2016 года). – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – Т. II. – С. 68–70.
19. Арутюнов Т.В., Савенок О.В., Шляховой Д.С. Постановка задачи экспериментальных исследований глинисто-кремнистых сланцевых пород // Наука и техника в газовой промышленности. – 2016. – № 2 (66). – С. 3–10.
20. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Экспериментальные исследования глинисто-кремнистых сланцевых пород с точки зрения способности создания новых поверхностей // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». – 2016. – № 2. – С. 38–41.
21. Арутюнов Т.В., Савенок О.В., Шляховой Д.С. Теоретическое исследование процесса формирования искусственных образцов глинисто-кремнистых сланцевых пород // Инженер-нефтяник. – 2016. – № 3. – С. 34–39.
22. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Характеристика пород-коллекторов сланцевого газа / Материалы восьмой международной научной конференции «ТТС-16»: «Технические и технологические системы» (24–26 ноября 2016 года); ФГБОУ ВО «КубГТУ», КВВАУЛ им. А.К. Серова; под общей редакцией Б.Х. Гайтова. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2016. – С. 253–261.
23. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Анализ применения технологии термогазового воздействия на Средне-Назымском нефтяном месторождении / Материалы девятой Международной научной конференции «ТТС-17»: «Технические и технологические системы» (22–24 ноября 2017 года) / ФГБОУ ВО «КубГТУ», КВВАУЛ им. А.К. Серова; под общей редакцией Б.Х. Гайтова. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2017. – С. 217–230.
24. Арутюнов Т.В., Савенок О.В., Шляховой Д.С. Исследование удельной поверхности сланцевых пород // Наука и техника в газовой промышленности. – 2017. – № 4 (72). – С. 62–78.
25. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Методология оценки запасов сланцевого газа / сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции, посвящённой 100-летию Кубанского государственного технологического университета и 25-летию кафедры машин и оборудования нефтяных и газовых промыслов Армавирского механико-технологического института: «Наука и технологии в нефтегазовом деле» (09–10 февраля 2018 г.). – Краснодар : ФГБОУ ВО «КубГТУ». – 2018. – Секция 3: «Управление и мониторинг разработки месторождений нефти и газа». – С. 127–129.
26. Арутюнов Т.В., Савенок О.В., Шляховой Д.С. Исследование процесса формирования искусственных образцов глинисто-кремнистых сланцевых пород // Наука и техника в газовой промышленности. – 2018. – № 1 (73). – С. 3–12.

References:

1. Arutyunov T.V., Pozdnyak A.N., Savenok O.V. The prospects of development of slate oil on the example of YuS_0 layer of the Salym field / Materials VII of the All-Russian conference: «Problems of development of fields of hydrocarbonic and ore useful minerals» (on October 28–31, 2014). – Perm : Publishing house of the Perm national research polytechnical university, 2014. – P. 203–206.
2. Arutyunov T.V., Antoniadi D.G., Savenok O.V. Analysis of methods and technologies of industrial development of fields of hydrocarbons of slate deposits // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin), 2014. – No. 3. – P. 43–47.
3. Arutyunov T.V., Savenok O.V. A state, tendencies and the prospects of development of reserves of hydrocarbons from slate deposits // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin), 2014. – No. 4. – P. 39–51.
4. Arutyunov T.V., Arutyunov A.A., Savenok O.V. Features of development of the Salym oil field (on the example of YuS_0 layer) / Materials II of the All-Russian scientific and practical conference: «Basic and applied researches in Russia: problems and prospects of development» (on January 19, 2015). – Rostov-on-Don: Professional press, 2015. – P. 40–52.
5. Arutyunov T.V., Arutyunov A.A., Savenok O.V. Prospects of development of fields of slate deposits / collection of articles of the International scientific and practical conference: «Fundamental problems of science» (on January 23, 2015). – Ufa : RIO MTsII OMEGA SAYNS, 2015. – P. 126–135.
6. Arutyunov T.V., Arutyunov A.A., Savenok O.V., Mollayev Z.H. Metodologiya of assessment of resources of slate deposits // Mountain information and analytical bulletin (scientific and technical magazine). – 2015. – No. 3. – P. 266–271.
7. Arutyunov T.V., Arutyunov A.A., Savenok O.V. Problem definition of physical and chemical modeling of slate breeds // oil Engineer. – 2015. – No. 1. – P. 42–47.

8. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Research of slate breeds and nature of slate oil-bearing capacity of the Bazhenov shale and formation Bakken // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin), 2015. – No. 1. – P. 28–46.
9. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Features of a structure of fields of slate deposits / Works of the XIX International symposium of a name of the academician M.A. Usov of students and young scientists devoted to 70-year anniversary of the Victory of the Soviet people over fascist Germany: «Problems of geology and development of a subsoil» (on April 6-10, 2015). – Tomsk : Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2015. – T. II. – P. 385–387.
10. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Analysis of characteristics of a geological structure and collection properties of slate deposits // Oil. Gas. Innovations. – 2015. – No. 4. – P. 72–76.
11. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Principles of modeling of steam structure of slate breeds / XIII International scientific and practical conference: «Modern concepts of scientific research» (Russia, Moscow, on April 29–30, 2015) // Monthly scientific magazine No. 4 (13)/2015. – Moscow : Euroasian union of scientists, 2015. – Part 11. – P. 103-109..
12. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Life cycle of an innovative product – slate gas / materials of the scientific and practical conference of students, All-Russian with the international participation, graduate students and young scientists: «New technologies – to the oil and gas region» (on May 19–20, 2015). – Tyumen : TSOGU, 2015. – T. 1. – P. 49–52.
13. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Prospettive di shale gas Russa // Italian Science Review. 2015; 5(26). PP. 138–145. – URL : <http://www.ias-journal.org/archive/2015/may/Arutyunov.pdf>
14. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Modeling of clay breeds with kollomorfný silicon dioxide // the oil Engineer. – 2015. – No. 2. – P. 18–21.
15. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Assessment of parameters of pore space of clay breeds for the purpose of modeling of steam structure of slate deposits // Materials of the X International symposium devoted to the 70 anniversary of the Victory: «Fundamental and applied problems of science». – M. : RAS, 2015. – T. 2. – P. 88–100.
16. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Environmental problems when developing fields of slate hydrocarbons // Environment protection in an oil and gas complex. –2015. – No. 9. – P. 39–42.
17. Arutyunov T.V., Savenok O.V., Koshelev A.T. Development of methodology of preparation of examples of clay and siliceous breeds taking into account factors of heterogeneity and uncertainty // Construction of oil and gas wells by land and by sea. – 2015. – No. 10. – P. 25–28.
18. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Technology of extraction of slate gas and influence on Ecology / Works XX of the International symposium of a name of the academician M.A. Usov of students and young scientists devoted to the 120 anniversary from the date of foundation of the Tomsk polytechnical university: «Problems of geology and development of a subsoil» (on April 4–8, 2016). – Tomsk : Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2016. – T. II. – P. 68–70.
19. Arutyunov T.V., Savenok O.V., Shlyakhovoy D.S. Problem definition of pilot studies of clay and siliceous slate breeds // Science and technology in the gas industry. – 2016. – No. 2 (66). – P. 3–10.
20. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Pilot studies of clay and siliceous slate breeds from the point of view of ability of creation of new surfaces // the Scientific and technical bulletin of JSC Rosneft. – 2016. – No. 2. – P. 38–41.
21. Arutyunov T.V., Savenok O.V., Shlyakhovoy D.S. Theoretical research of process of formation of artificial examples of clay and siliceous slate breeds // oil Engineer. – 2016. – No. 3. – P. 34–39.
22. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Characteristic of breeds collectors of slate gas / Materials of the eighth international scientific TTS-16 conference: «Technical and technological systems» (on November 24–26, 2016); FGBOOU WAUGH of «KUBGTU», KVVAUL of A.K. Serov; under the general editorial office B.H. Gaytova. – Krasnodar : Publishing house – the South, 2016. – P. 253–261.
23. Arutyunov T.V., Savenok O.V. The analysis of use of technology of thermogas influence on the Average and Nazymisky oil field / Materials of the ninth International scientific TTS-17 conference: «Technical and technological systems» (on November 22–24, 2017) / FGBOOU WAUGH of «KUBGTU», KVVAUL of A.K. Serov; under the general editorial office B.H. Gaytova. – Krasnodar : Publishing house – the South, 2017. – P. 217–230.
24. Arutyunov T.V., Savenok O.V., Shlyakhovoy D.S. Issledovaniye of a specific surface of slate breeds // Science and technology in the gas industry. – 2017. – No. 4 (72). – P. 62–78.
25. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Methodology of assessment of reserves of slate gas / collection of theses of reports of the International scientific and practical conference devoted to the 100 anniversary of the Kuban state technological university and the 25 anniversary of department of cars and the equipment of oil and gas fields of the Armavir mekhaniko-institute of technology: «Science and technologies in oil and gas business» (on February 09–10, 2018). – Krasnodar : FGBOOU WAUGH «KUBGTU». – 2018. – Section 3: «Management and monitoring of development of oil and gas fields». – P. 127–129.
26. Arutyunov T.V., Savenok O.V., Shlyakhovoy D.S. Issledovaniye of process of formation of artificial examples of clay and siliceous slate breeds // Science and technology in the gas industry. – 2018. – No. 1 (73). – P. 3–12.