

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДОБЫЧИ СЛАНЦЕВОГО ГАЗА

Сорокин С.Н., Горячев А.А.

Институт Энергетических Исследований РАН (ИНЭИ РАН), г. Москва

В настоящее время, многие государства прикладывают усилия по разработке нетрадиционных залежей природного газа, к которым, в частности, относятся газосланцевые плеи. Данный факт обусловлен падением собственной добычи газа из традиционных месторождений в добывающих странах, ростом зависимости от импорта газа и ростом спроса на газ.

В течение последних трех лет этому вопросу уделяется большое внимание на различных уровнях: от политики до экологии. Не смотря на широкую форму диалогов по этому вопросу, до сих пор существует некая неопределенность в отношении перспектив добычи и существующих проблем при разработке газосланцевых плеев.

Nowadays, many countries are making efforts to develop unconventional natural gas resources, which in particular shale gas plays are referred to. This fact take place due to falling domestic production of gas from traditional fields in the gas producing countries, increasing dependence on gas imports and growth in the demand for gas.

In the past three years the subject have been given a lot of attention at various levels: from political to ecological. Despite the broad shape of the dialogue on this issue, there is still some uncertainty about the production perspectives and the existing shale gas plays developing problems.

Говоря о сланцевых полях, обычно употребляют такое понятие как газосланцевый плей. «Плей» (play) – совокупность однотипных месторождений открытых или предполагаемых, поиски и разведка которых ведутся по одной методике и одинаковым комплексом технических средств, сосредоточенных в одном нефтегазоносном комплексе в пределах одной тектонической зоны, включающей один или несколько смежных структурных элементов.

Ввиду того, что мировой опыт разработки газосланцевых залежей сосредоточен в США, на рисунке 1 представлены их основные газосланцевые плеи. Сланцы — горные породы, с параллельным (слоистым) расположением низкотемпературных минералов, входящих в их состав. Они характеризуются сланцеватостью — способностью легко расщепляться на отдельные пластины.

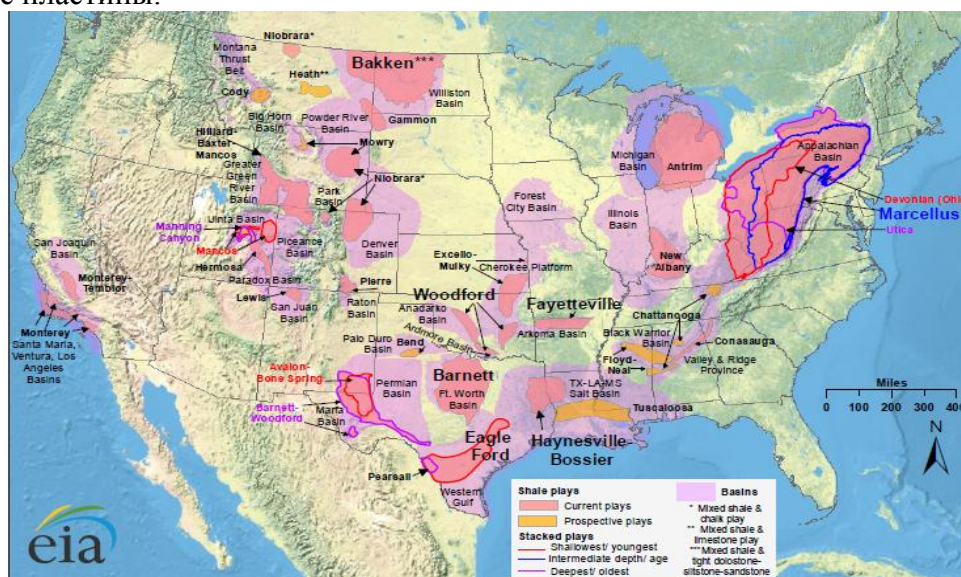


Рисунок 1 – Газосланцевые плеи США

Источник: EIA, http://www.eia.gov/oil_gas/rpd/shale_gas.pdf

Анализ показателей разрабатываемых плеев в США позволяет отметить ряд характерных особенностей. Глубина залегания газоносных сланцев, как и традиционных месторождений нефти и газа, находится в очень широком диапазоне от 150 до 4 100 м, при этом мощности пластов находятся в диапазоне от 6 до 600 м (Таблица 1). Пористость сланцев варьируется от 2% до 14%.

Таблица 1 - Показатели основных газосланцевых плеев США

Название плей	Barnett	Fayetteville	Haynesville	Marcellus	Woodford	Antrim	New Albany
Площадь распространения плей, км ²	13000	23300	23300	246000	28500	31000	112600
Глубина залегания газоносных сланцев, м	2000-2600	300-2100	3200-4100	1200-2600	1800-3350	200-670	150-600
Эффективная толщина, м	30-180	6-60	60-100	15-60	35-65	20-35	15-610
Глубина залегания источников питьевой воды, м	≈365	≈150	≈120	≈260	≈120	≈90	≈120
Общая пористость, %	4-5	2-8	8-9	10	3-9	9	10-14
Газосодержание, м ³ /т.	8,4-10	1,6-6,1	2,8-9,2	1,6-2,8	5,6-8,4	1,1-2,8	1,1-2,2
Добыча воды, м ³ /сут.	0	0	0	0		0,8-80	0,8-80
Плотность скважин, км ²	0,2-0,6	0,3-0,6	0,16-2,2	0,16-0,6	2,6	0,16-0,6	0,3
Геологические запасы, трлн. м ³ (2008г.)	9,15	1,5	20	42	1,45	2,1	4,5
Извлекаемые запасы, трлн.м ³ (2008г.)	1,2	1,16	7	10,1	0,3	0,56	0,53
Добыча газа, тыс. м ³ /сут/скв	9,4	14,8 ¹²	17,5-50	87	11,6 ¹²	3,5-5,6	

Источник: All Consulting J. Daniel Arthur, Brian Bohm, Bobbi Jo Coughlin, Mark Layne, *Evaluating the Environmental Implications of Hydraulic Fracturing in Shale Gas Reservoirs*, 2008, расчеты авторов

Высокая плотность породы и как следствие низкие фильтрационно-емкостные свойства определяют необходимость бурения большого количества горизонтальных скважин и применение технологии гидроразрыва пласта (ГРП). На разрабатываемых плейях применяется от 5 до 12 стадий ГРП.

Длина горизонтального ствола варьируется от 700 до 3 000 м. Данные факторы существенно влияют на стоимость скважины и себестоимость добываемого газа. Публикуемые данные о стоимости скважины с учетом проведения ГРП варьируются в диапазоне от 3 до 10 млн. долларов США, а себестоимость добычи – от 100 до 175 \$/тыс.м³.

Говоря об объемах добычи сланцевого газа, следует отметить, что она ежегодно растет и оценочные показатели по итогам 2011 года составляют 210 млрд. м³ (Рисунок 2). Официальной статистики добычи сланцевого газа за 2010 год также не опубликовано, однако из представленного графика месячной добычи сланцевого газа по основным газосланцевым плейам США, оценочный уровень добычи составляет 150-155 млрд. м³.

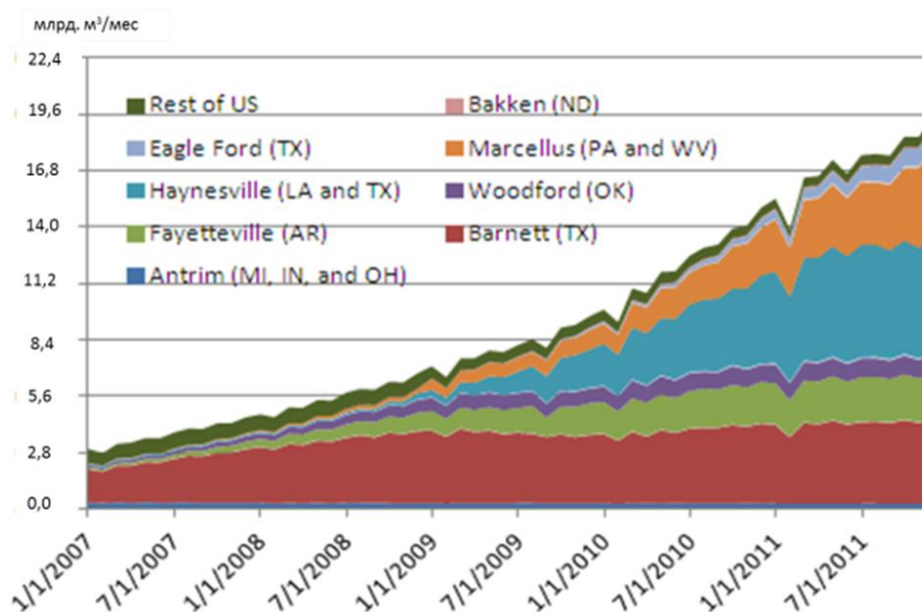


Рисунок 2 - Динамика месячной добычи сланцевого газа по основным газосланцевым полям США

Источник: EIA, http://205.254.135.7/dnav/ng/ng_pri_fut_sl_m.htm, расчеты авторов

Добыча сланцевого газа в США стала активно развиваться в последние пять лет, что было обусловлено высокими ценами на газ на американском рынке. В то время как цена на газ составляла 250-350 \$/тыс.м³, себестоимость в 150 долларов воспринималась абсолютно нормально. Сейчас же ситуация немного иная. На рисунке 3 представлена динамика изменения цены на газ на Henry Hub. В период с июня 2008 г., когда наблюдались пиковые цены на газ, по декабрь 2011 г. стоимость тысячи кубометров упала в 4 раза.

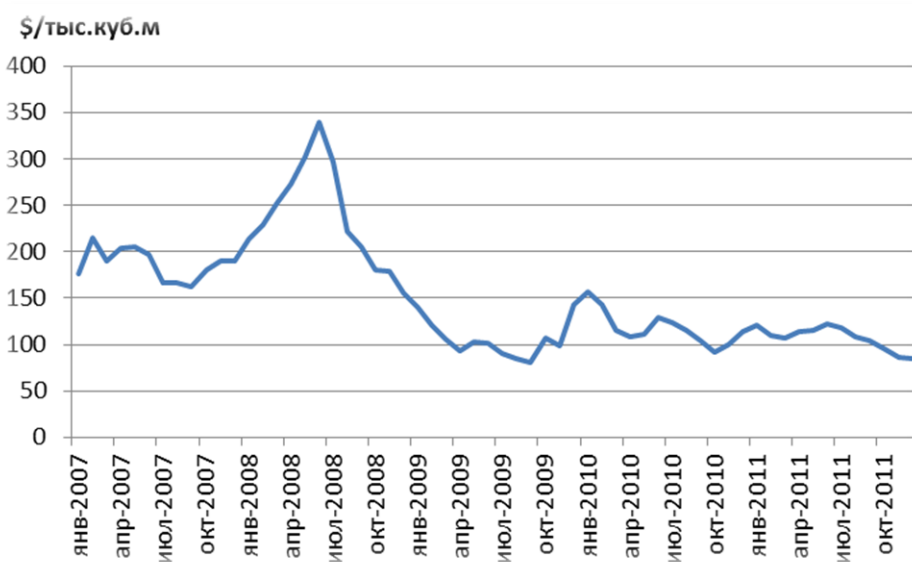


Рисунок 3 - Динамика изменение цены на газ на Henry Hub

Источник: EIA, <http://205.254.135.7/naturalgas/weekly/>, расчеты авторов

В сложившихся условиях, некоторые компании говорят о том, что сейчас не выгодно вкладывать 10 млн. \$ в бурение скважины для получения газа стоимостью в 90 \$/тыс. м³, если при таких же инвестициях можно добывать сланцевую нефть стоимостью 115-120 \$/баррель. Однако падения добычи сланцевого газа в ближайшие несколько лет ожидать не стоит.

Для оценки возможностей добычи сланцевого газа на перспективу, рассмотрим профили добычи скважин газосланцевого плеса Fayetteville (Арканзас). Данный газосланцевый плес является одним из первых, разработка которого велась с использованием технологии горизонтального бурения. Таким образом, профили добычи газа данного плеса в период с октября 2005 года по сентябрь 2010 года помогут оценить реальную возможность добычи сланцевого газа. Извлекаемые запасы газа составляют 1,15 - 1,62 трлн. м³. Динамика накопленной добычи сланцевого газа за ретроспективный период с 2005 по 2010 гг представлена на рисунке 4.

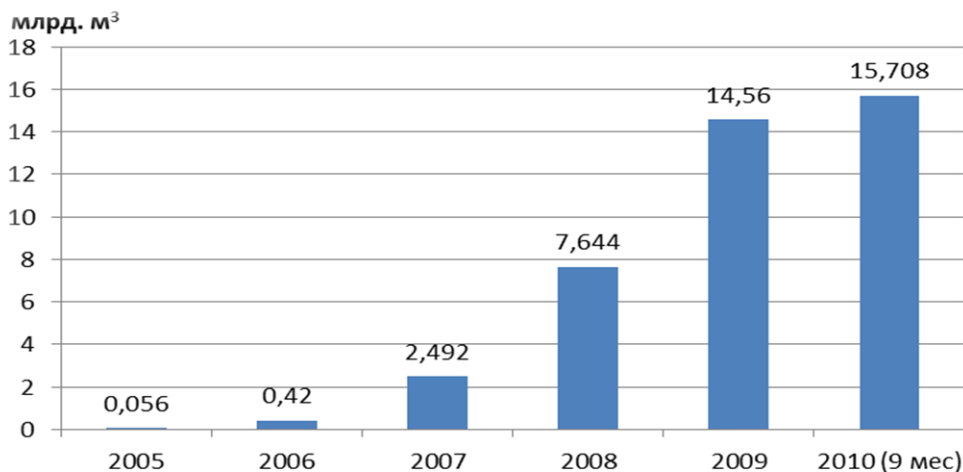


Рисунок 4 – Накопленная добыча сланцевого газа с плеса Fayetteville

Источник: James E. Mason, Hydrogen Research Institute, Well Production Profiles for the Fayetteville Shale Gas Play, Pre-Publication Article Oil and Gas Journal April 4, 2011 Issue, расчеты авторов

Как видно из представленного графика, к сентябрю 2010 г из плеса отобрано более 15,7 млрд. м³ газа, при этом основные приросты добычи приходятся на 2008 и 2009 гг.

Очевидно, что рост добычи газа является прямым следствием значительного увеличения количества скважин. Ежегодный прирост новых скважин также учитывался и представлен на рисунке 5.

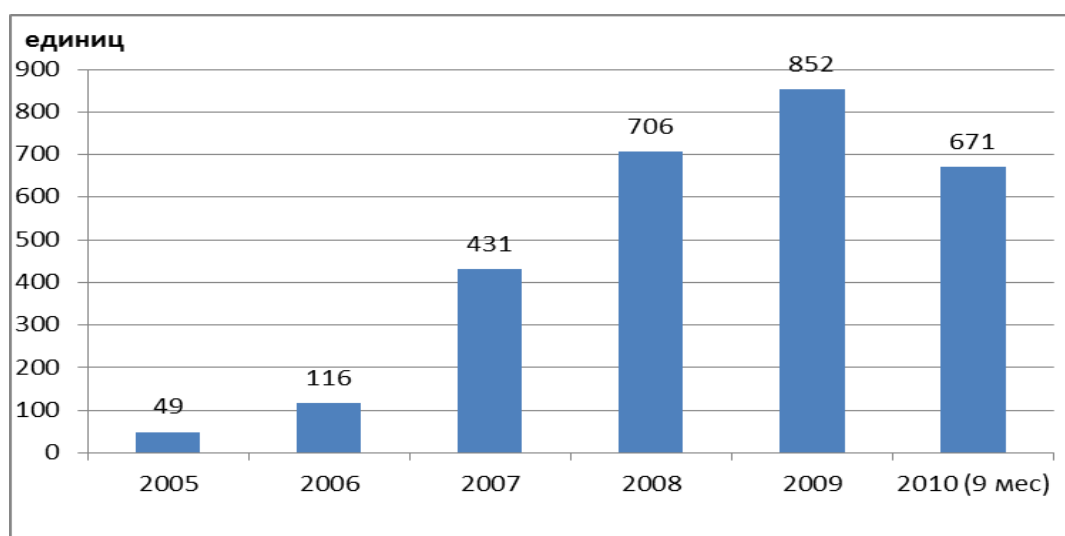


Рисунок 5 – Динамика ввода новых скважин на газосланцевом плесе Fayetteville

Источник: James E. Mason, Hydrogen Research Institute, Well Production Profiles for the Fayetteville Shale Gas Play, Pre-Publication Article Oil and Gas Journal April 4, 2011 Issue, расчеты авторов

Четырехлетняя история добычи газа по скважинам показывает наличие пикового периода добычи газа в течение первых двух месяцев с резким падением в последующие (Рисунок 6). Из представленного рисунка видно, что с течением времени происходит стабилизация добычи газа, но на довольно низком уровне. Наблюдаемые скачки роста производительности скважин могут быть обусловлены повторным проведением ГРП. Таким образом, первый год эксплуатации скважин является очень важным периодом, на которой приходится основная добыча сланцевого газа.

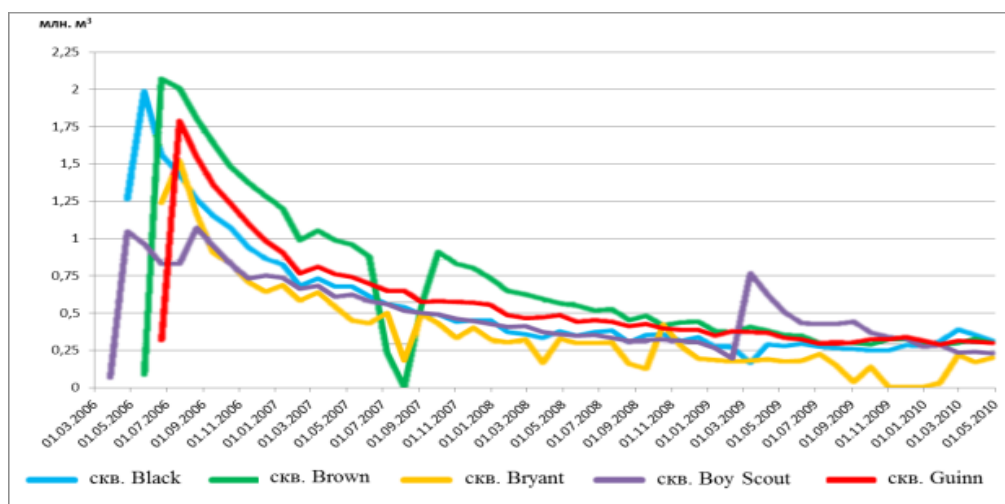


Рисунок 6 – Профиль добычи сланцевого газа с плей Fayetteville

Источник: James E. Mason, Hydrogen Research Institute, Well Production Profiles for the Fayetteville Shale Gas Play, Pre-Publication Article Oil and Gas Journal April 4, 2011 Issue, расчеты авторов

Был произведен расчет необходимости ввода новых скважин для поддержания постоянного уровня добычи в объеме 14 млрд. м³/год и эксплуатации плей в течение 40 лет (Рисунок 7). Ежегодный прирост новых скважин в первые три года составляют от 1220 до 670 единиц в год. В последующие периоды необходим ввод не менее 285 скважин в год. Общий фонд скважин за весь период эксплуатации плей, составит 14 549 единиц. Что значительно превышает кол-во скважин на традиционных месторождениях.

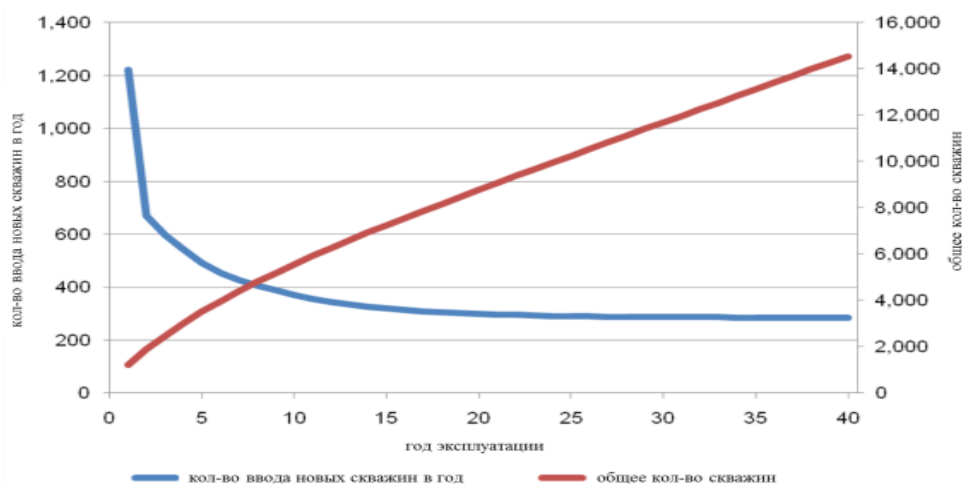


Рисунок 7 - Расчетные показатели роста кол-ва новых скважин на газосланцевом плее Fayetteville

Источник: James E. Mason, Hydrogen Research Institute, Well Production Profiles for the Fayetteville Shale Gas Play, Pre-Publication Article Oil and Gas Journal April 4, 2011 Issue, расчеты авторов

Преимущества добычи сланцевого газа в отличие от крупнейших традиционных месторождений — приближенность к центрам потребления. Но этот же фактор

накладывает дополнительные ограничения по экологии. Добыча сланцевого газа сталкивается и с серьезными экологическими ограничениями ввиду большого охвата площадей и значительного и интенсивного нарушения целостности недр.

Среди основных экологических проблем, приписываемых разработке газосланцевых плев, можно выделить следующие:

- загрязнение грунтовых вод;
- выбросы;
- сейсмические риски;
- поверхностные загрязнения воды и почвы

В настоящее время, практически во всех странах, где есть возможность начать промышленную добычу сланцевого газа, а также и в США, созданы экологические комиссии по рассмотрению возможных экологических катастроф от разработки плев. Мы также постараемся разобраться с этими вопросами.

Загрязнение грунтовых вод

Наиболее часто обсуждаемой проблемой является загрязнение грунтовых вод. Суть проблемы заключается в том, что при проведении ГРП, в глубоких образованиях сланца могут возникнуть микротрещины, через которые метан и жидкости для ГРП могут мигрировать в вышележащие водоносные горизонты, предназначенные для отбора питьевой воды. Тем не менее, как видно из Рисунка 8, водоносные горизонты питьевой воды в США находятся на значительном (не менее 100 м) расстоянии от залежей сланцев, за исключением плев Antrim и New Albany.

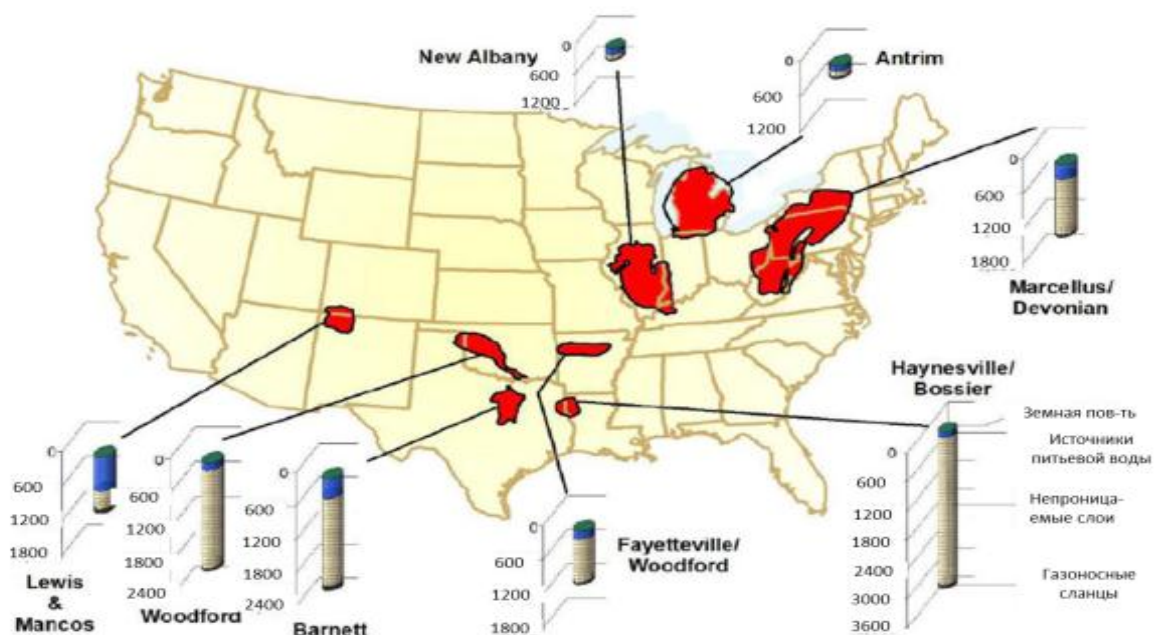


Рисунок 8 - Глубина залегания газонасыщенных сланцев и подземных источников питьевых вод, м

Источник: Mark Zoback (Stanford Department of Geophysics), Saya Kitasei (Worldwatch Institute), Brad Copithorne (Environmental Defense Fund), Briefing Paper 1, Addressing the Environmental Risks from Shale Gas Development, July 2010; GWPC, расчеты авторов

Например, газосланцевые слои плев Marcellus, который распространяется от штата Нью-Йорк через Пенсильванию, Западную Вирджинию и по территории Огайо, залегают на глубинах 1 200 - 2 500 м. В то время как самые глубокие подземные источники питьевой воды в этом регионе залегают на глубине 250 м. Геологи подсчитали, что в диапазоне между питьевыми водоносными горизонтами и газонасыщенными сланцами находятся по меньшей мере 9 слоев непроницаемых пород, каждый из которых выступает в качестве барьера для вертикального распространения любых веществ, как газа, так и жидкостей.

Поскольку прямое загрязнение подземных источников питьевой воды через трещины, образовавшиеся в результате проведения ГРП, потребуют распространения жидкости для ГРП через сотни метров вверх за границы целевого формирования через многие слои других пород, такое загрязнение весьма маловероятно. Данный факт также был резюмирован и в отчете американских специалистов в феврале 2012 года.

Практически единственным способом загрязнения подземных источников питьевых вод может быть плохое цементирование затрубного пространства обсадных колонн. В настоящее время существует широкий круг мероприятий, позволяющий определить качество цементирования и решить подобную проблему. Постоянный контроль и тестирование также позволят производителям и регулирующим органам предотвращать такие катастрофы.

Выбросы

Произошедшие выбросы газа из скважин в Пенсильвании и Западной Вирджинии во время буровых работ на газосланцевом плее Marcellus подчеркивают общественные и экологические риски, связанные с бурением в зоне высоких давлений и закачку под давлением жидкостей для ГРП. Операторы в Пенсильвании сообщили, что выброс произошел, потому что противовыбросовое оборудование не было рассчитано на, как оказалось, столь высокое давление. В Западной Вирджинии, по сообщениям буровиков, они столкнулись с карманом метана в заброшенной угольной шахте на глубине порядка 300 м, а противовыбросовое оборудование тогда еще не установлено. Такие катастрофы, подчеркивают потребность в высоком уровне профессионализма рабочего персонала даже в форс-мажорных ситуациях.

Сейсмические риски

Еще одним риском, связанным с добычей сланцевого газа, который в последнее время удостоился внимания, является возможность того, что бурение скважин и проведение ГРП может привести к возникновению низко-магнитудных землетрясений.

В 2008 и 2009 гг. в городе Клебурн, штат Техас, произошли несколько землетрясений, магнитудой до 3,3 баллов по шкале Рихтера. Поскольку в этом городе за 142-летнюю историю его существования никогда не были зарегистрированы землетрясения, некоторые жители предположили, что это вызвано большим ростом местных буровых работ, связанных с разработкой газосланцевого плее Barnett. Исследования, проведенные сейсмологами из Техасского Университета и Южного Методического Университета не нашли убедительной связи между проведением ГРП и этими землетрясениями.

В то время как процесс ГРП сопровождается большим количеством микросейсмических событий (микроземлетрясениями), обнаружить эти следы на поверхности практически невозможно. На рисунке 9 представлены скважинные данные, пробуренной в плее Barnett от проведения 11 стадий ГРП, а также накопленное частотное распределение микросейсмических событий различного уровня по соседним скважинам. В целом, скважинные сейсмометры обнаружили порядка 1000 микроземлетрясений. Самые сильные микро землетрясения имеют магнитуду около -1,6. Кол-во самых слабых микро землетрясений (меньше чем -2,8) уменьшается, потому что они настолько слабы, что просто не могут быть зафиксированы.

Данная проблема требует дальнейших исследований. От проведения столь частых операций ГРП и способности сланцев легко расщепляться на отдельные пластины, могут возникнуть техногенные катастрофы на поверхности.

Поверхностные загрязнения воды и почвы

Из-за большого количества различных химических реагентов на буровых площадках и большого количества твердых и жидких отходов, получаемых в процессе бурения скважин, значительное внимание должно быть уделено тому, чтобы эти вещества не загрязняли поверхностные воды и почву во время их транспортировки, хранения и утилизации.

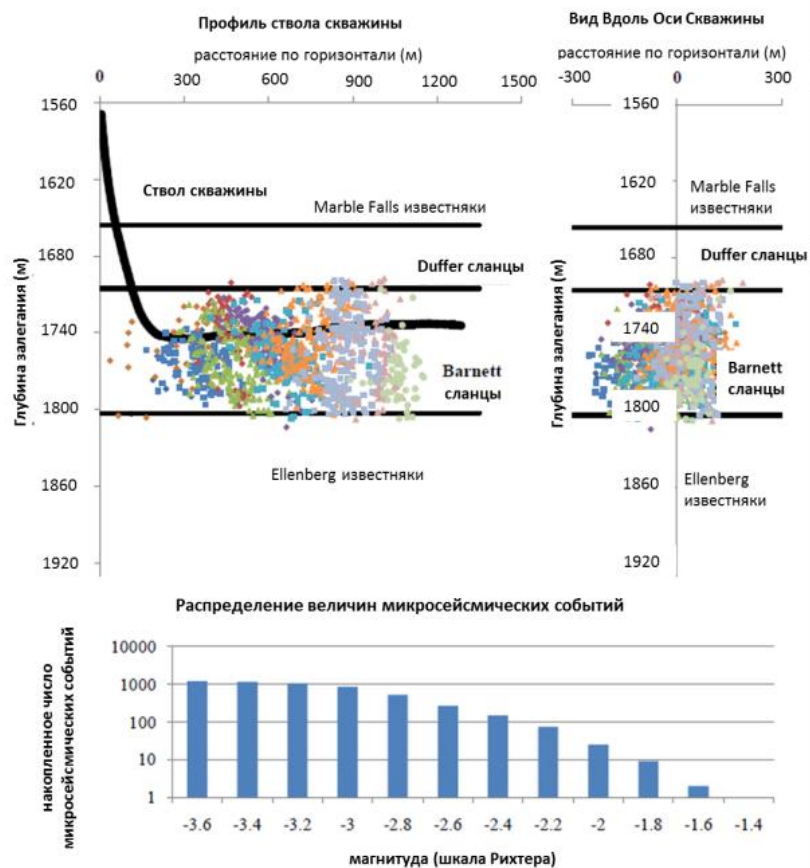


Рисунок 9 - Сквацинные данные от проведения 11 стадий ГРП, а также накопленное частотное распределение микросейсмических событий

Источник: Mark Zoback (Stanford Department of Geophysics), Saya Kitasei (Worldwatch Institute), Brad Copithorne (Environmental Defense Fund), Briefing Paper 1, Addressing the Environmental Risks from Shale Gas Development, July 2010

Жидкости, используемые для проведения современной операции ГРП, как правило, на 95-98% состоят из воды и пропантов, и лишь небольшую составляющую имеют различные химические реагенты.

Поскольку состав жидкостей для ГРП в каждом случае будет индивидуален по составу химических реагентов, и поскольку эти вещества могут быть опасными при достаточной концентрации, необходимо позволить регулирующим органам и специалистам по здравоохранению производить тестирование воды и почвы. В настоящее время, ряд сервисных компаний проводят исследования еще более экологичных жидкостей для ГРП для содействия снижению экологических рисков. С этой же целью, для хранения и очистки жидкостей, необходимо использование закрытых резервуаров с постоянной проверкой герметичности всех соединений и целостности самих резервуаров для избегания разливов вредных веществ на поверхность.

Говоря об усовершенствовании технологий добычи сланцевого газа, следует отметить, что за последний год не получили распространения какие-либо прорывные технологии, позволяющие существенно снизить стоимость добычи сланцевого газа.

Наиболее вероятным способом усовершенствования технологий выглядит совершенствование технологии размещения скважин и бурение многоствольных горизонтальных скважин (Рисунок 10). Строительство подобных скважин поможет более качественно распределять их по площади, тем самым нанося меньший ущерб окружающей среде. Такие скважины будут иметь более высокую производительность, по сравнению с существующими и распределяя стадии проведения ГРП на каждом стволе можно будет добиться высоких показателей добычи в течение более длительного времени (3-5 лет). Кроме того, совершенствуя технологии бурения появляются возможности

бурения еще более длинных и совершенных горизонтальных участков скважины, позволяющих охватить максимальную площадь для добычи газа.



Рисунок 10 - Многоствольная горизонтальная скважина

Источник: NASEO/ASERTTI Meeting, Ron Edelstein, Regulatory and State Relations, Washington, February 2, 2011

Учитывая многообразие вышеизложенных фактов, возникает вопрос: как же оценить перспективы и возможности добычи сланцевого газа и их влияние на рынок газа? Существует несколько методов и подходов к оценке перспектив развития рынков газа и в частности под влиянием процесса добычи сланцевого газа как неотъемлемой его части:

- Экспертное мнение. Одним из самых простых методов может являться опрос мнения соответствующих экспертов по газу, в каждом регионе своего. Однако, это, как и следовало ожидать, может привести к предвзятости мнения в случае, если оно не подкреплено соответствующей доказательной базой.
- Консенсус-прогноз. Средневзвешенное нескольких прогнозов и мнений не всегда применимо, т.к. потенциальное различие методологий и предпосылок может привести к еще большей ошибке и несоответствию.
- Трендовый подход также мало применим к данной проблематике, поскольку нет пока достаточной истории и статистических данных для экстраполяции и продления.
- Оптимизационное моделирование позволяет в одном комплексном подходе учесть влияние всех необходимых экономических и неэкономических факторов.

Для комплексной оценки перспектив добычи сланцевого газа по регионам мира, в особенности на длительную перспективу было решено применить метод оптимизационного моделирования с использованием Мировой Модели Рынков Газы ИНЭИ РАН.

Модель по своей структуре охватывает все важнейшие особенности и взаимосвязи газовой промышленности. Система включает в себя обширные базы данных по добывающим и инфраструктурным проектам, включая трубопроводы, терминалы сжижения и регазификации, маршруты СПГ, ПХГ, газовые контракты. Модель имитирует организацию рынка по принципу совершенной конкуренции, учитывая:

- Долгосрочные контракты;
- Сценарные и инфраструктурные ограничения;
- Межтопливную конкуренцию, путем переключения на другие виды топлива.

Это линейно-оптимизационная модель с оптимизацией симплекс методом. Региональный охват модели включает в себя все страны мира, некоторые из которых поделены на несколько узлов. Критерием оптимальности является минимум суммарных затрат (I_{Σ}) на удовлетворение спроса, т.е. добычу и транспортировку газа от производителей к потребителям. Искомые переменными являются объемы газа по каждому процессу. Задачей является поиск минимума целевой функции с учетом ограничений на область допустимых решений: сценарных, инфраструктурных, контрактных. Временной охват модели: до 2035 года по кварталам. Таким образом, задача оптимизации выглядит как поиск минимума целевой функции суммарных издержек (I_{Σ}), имеющий вид:

$$I_{\Sigma} = \sum_{\text{МЕСТ}} I_{\text{ДОБ}} + \sum_{\text{ТРУБ}} I_{\text{ТР}} + \sum_{\text{СПГ}} I_{\text{СЖИЖ}} + \sum_{\text{СПГ}} I_{\text{ТР}} + \sum_{\text{СПГ}} I_{\text{РЕГ}} + \sum_{\text{ПХГ}} I_{\text{ХРАН}} + \sum_{\text{ТРУБ}} I_{\text{КОН}} + \sum_{\text{СПГ}} I_{\text{КОН}} + \sum_{\text{УЗЛ}} I_{\text{ПЕР}}, \text{ где:}$$

- $\sum_{\text{МЕСТ}} I_{\text{ДОБ}}$ – суммарные издержки на добычу газа по всем месторождениям,
- $\sum_{\text{ТРУБ}} I_{\text{ТР}}$ – суммарные издержки на трубопроводный транспорт газа по всем транспортным коридорам,
- $\sum_{\text{СПГ}} I_{\text{СЖИЖ}}$ – суммарные издержки на сжижение газа по всем заводам СПГ,
- $\sum_{\text{СПГ}} I_{\text{ТР}}$ – суммарные издержки на транспортировку СПГ по всем возможным маршрутам транспортировки,
- $\sum_{\text{СПГ}} I_{\text{РЕГ}}$ – суммарные издержки на регазификацию по всем заводам по регазификации,
- $\sum_{\text{ПХГ}} I_{\text{ХРАН}}$ – суммарные издержки на хранение газа по всем ПХГ,
- $\sum_{\text{ТРУБ}} I_{\text{КОН}}$ – суммарные издержки по оплате контрактов по трубопроводному газу,
- $\sum_{\text{СПГ}} I_{\text{КОН}}$ – суммарные издержки по оплате контрактов на поставки СПГ,
- $\sum_{\text{УЗЛ}} I_{\text{ДСР}}$ – суммарные издержки на переключение потребителей на альтернативные виды топлива.

Процесс добычи газа представлен в модели по месторождениям, за исключением мелких, объединенных в группы, и характеризуется следующим набором параметров:

- Узел;
- Общие и остаточные запасы по месторождению (группе);
- Планируемые проектные капитальные затраты и операционные издержки;
- Текущая степень реализации проекта;
- Профили добычи;
- Гибкость (возможность краткосрочного изменения уровня добычи);
- Временные ограничения начала и окончания эксплуатации месторождения;

Что касается сланцевого газа, то даже при существующих оценках перспектив удешевления технологий добычи газсланцевые плеи могут находиться в среднем ценовом диапазоне на перспективной кривой предложения и будут экономически рентабельными либо при соответствующем уровне цен на целевом рынке сбыта, либо при наличии государственной поддержки или льгот.

Касательно перспектив добычи следует отметить, что ситуация различается по каждому региону. В США более-менее сложились технологические предпосылки и отношение государства и общества к процессу добычи сланцевого газа. Поэтому можно сказать, что уровень добычи сланцевого газа в значительной степени будет зависеть лишь от цен на газ на внутреннем рынке. На рисунке 11 представлена прогнозная кривая предложения газа в США на 2030 год.

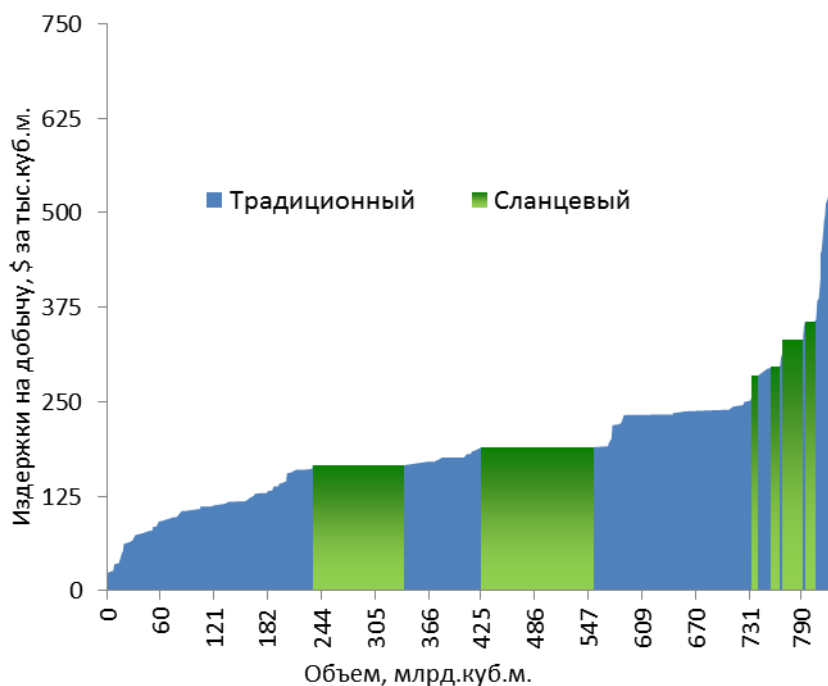


Рисунок 11 – Кривая предложения газа в США на 2030 год

Источник: *Перспективы развития мировой энергетики до 2030 г. [текст]. – М.: ИНЭИ РАН, 2011. – 50 с.*

В Китае ситуация совершенно иная. Здесь влияние перспектив добычи сланцевого газа на внутренний, а, следовательно, и на мировой, рынок будет в большей степени зависеть от доказанного разведочным бурением потенциала добычи. На рисунке 12 представлены результаты сценарного (HS и LS) прогноза структуры газового баланса в Китае на 2035 г.

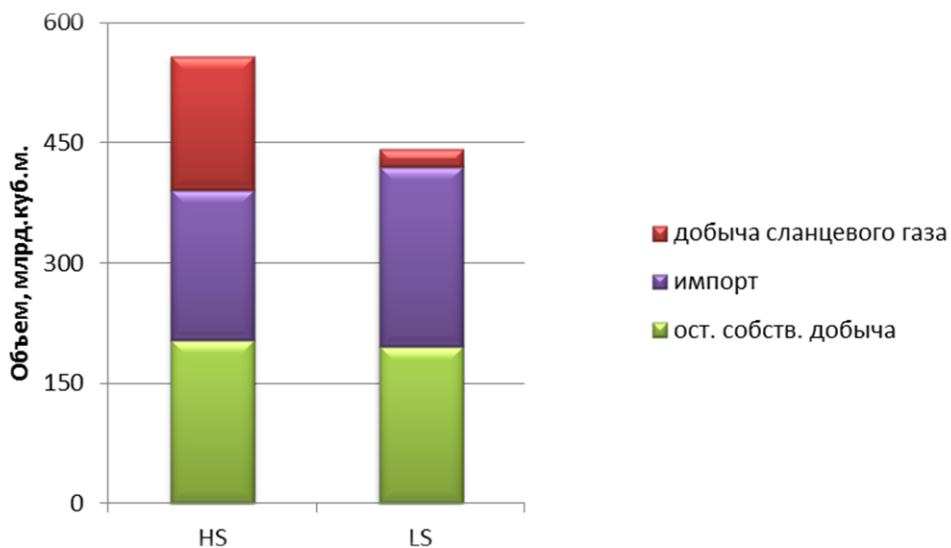


Рисунок 12 – Сценарный прогноз газового баланса в Китае на 2035 г.

Резюмируя изложенное, хотелось бы отметить, что большинство экологических проблем можно решить за счет более жесткого контроля за буровыми площадками и процессом добычи газа. Одним из действительно важных вопросов является изучение влияния ГРП на возникновения сейсмической активности и различного рода оползней. На традиционных месторождениях нефти и газа не проводят такого количества ГРП. От

проведения столь частых операций ГРП и способности сланцев легко расщепляться на отдельные пластины, могут возникнуть техногенные катастрофы на поверхности.

Перспективы добычи сланцевого газа, безусловно, велики, что также подчеркивает значимость и перспективность исследования данной темы, ведь сланцевый газ оказывает большое влияние на изменение мирового газового рынка уже сейчас.