

О.Е. Аксютин, А.Г. Ишков, В.А. Грачёв

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ДОБЫЧИ СЛАНЦЕВОГО ГАЗА В ЕВРОПЕ¹

На основе системного сравнительного анализа данных выявлены экономические, геологические, экологические проблемы добычи сланцевого газа, проанализировано потенциальное воздействие добычи сланцевого газа на атмосферу, поверхностные и подземные воды и на их радиационное загрязнение, влияние на геологическую среду и сейсмическую активность в регионах добычи, на ландшафты, земельные и биологические ресурсы. Сформулирован вывод о наличии серьёзных проблем, ставящих под сомнение целесообразность добычи сланцевого газа в Европе.

Актуальность проблемы. Разведка и добыча природного газа из сланцевых пластов – явление относительно новое. В течение последних лет растёт несоответствие между довольно изолированными дебатами и заключениями экспертов о влиянии добычи газа из нетрадиционных источников на окружающую среду, с одной стороны, и взглядом общества на эту проблему с другой. Последний в большей степени основывается на сообщениях СМИ, а также аргументах экологических активистов. Это разделение мира технических знаний и общественного восприятия выходит далеко за формальные рамки и может рассматриваться в первую очередь как некий социологический (формирующий различную степень приемлемости обществом добычи сланцевого газа) феномен. В его основе лежат недостаточная осведомленность и слабое распространение знаний об опыте, накопленном в последние два десятилетия в США и Канаде.

Природный газ из сланцевых формаций не подлежит извлечению традиционными методами, которые применяются в месторождениях конвенционального типа, из-за специфики форм присутствия и распространения. Многие технические аспекты добычи газа из нетрадиционных источников идентичны добыче из традиционных месторождений. Технологии его добычи – гидравлический разрыв пласта (ГРП) – [1] известны и используются на протяжении десятилетий в традиционной добыче, хотя, скорее, как исключение, чем правило.

В связи с противоречивостью мнений о необходимости добычи газа методом ГРП целесообразно провести сравнительный системный анализ имеющихся научных данных.

Направления исследования проблемы. В современных условиях, когда многие европейские страны обсуждают вопрос о разведке и добыче сланцевого газа, *перспективы развития добычи сланцевого газа* необходимо рассматривать, прежде всего, опираясь на опыт работы в этом направлении в США, где на сегодняшний день произведено около 1 млн. ГРП. Он свидетельствует, прежде всего, что наряду с экономической и социальной сторонами, важное значение имеет оценка возможных экологических последствий, связанных с добычей сланцевого газа.

¹ *Статья написана по результатам реализации проекта Международного делового конгресса. Научный руководитель темы Европейского делового конгресса: заместитель председателя Комитета Европейского делового конгресса «Экология и здравоохранение», А.Г. Ишков. Организация-исполнитель: Автономная некоммерческая организация «Научно-исследовательский институт проблем экологии» (НИИПЭ), научный руководитель В.А. Грачев, директор О.В. Плямина. Эксперты: Н.Н. Егоров; Е.П. Занева-Добранова (Республика Болгария), Г. Кысилка (Чешская Республика), В. Марчук (Чешская Республика), В.А. Лобковский, П. Райхтседер (Федеративная Республика Германия), А. Сикора (Республика Польша), А.А. Соловьянов, В.В. Тетельмин.*

Чтобы оценить развитие технологии добычи сланцевого газа в Европе, необходимо прийти к единому экспертному решению. Однако в настоящее время среди экспертов разных стран нет единого мнения о последствиях разведки и добычи сланцевого газа.

Методика исследования. Для оценки перспективы и проблем добычи сланцевого газа в Европе был проведен анализ основных аспектов воздействия разведки и добычи сланцевого газа, исходя из опыта США и Канады. Основное внимание было уделено рассмотрению экологических проблем (как возникших, так и потенциально возможных) по нижеследующим основным направлениям:

- загрязнение атмосферы технологическими и прочими выбросами и оценка возможного влияния на изменение климата вследствие выброса парниковых газов;
- загрязнение поверхностных и подземных вод высокотоксичными веществами и сточными водами, а также использование значительных объемов водных ресурсов для технологических целей;
- изъятие земельных ресурсов для размещения промышленных площадок и как следствие – изменение ландшафтов территорий, прилегающих к районам добычи;
- изменение сейсмической активности и радиационного фона территории вследствие изменения геологических условий в районах добычи.

Результаты исследования

Экономические проблемы. Себестоимость добычи сланцевого газа в Северной Америке, по оценкам Международного энергетического агентства (IEA), колеблется от 3 до 7 долл./1 Mmbtu (1 млн. британских термических единиц). Себестоимость его добычи в Европе прогнозируется на уровне от 8 до 12 долл./1 Mmbtu [2].

Долгосрочная разработка месторождений рентабельна лишь при высоких ценах на газ, поскольку на протяжении всего срока эксплуатации постоянно увеличиваются количество операций по ГРП и число скважин (вследствие резко падающего дебита), что требует высокого уровня капитальных вложений. Вместе с тем наблюдается снижение цен на природный газ до 2,4 долл./1 Mmbtu (на 01.01.2016 г.). Таким образом, существующие экономические проблемы не способствуют развитию отрасли.

В результате снижения цен на газ многие крупные американские компании, занимающиеся разработкой месторождений сланцевого газа, столкнулись с финансовыми трудностями. По оценкам главы нефтегазовой компании Total, в 2015 г. американские нефтяные компании закрыли две трети всех буровых вышек в США [3].

Геологические проблемы. Срок эксплуатации сланцевых скважин гораздо меньше, чем обычных газовых скважин. Если средний срок жизни газовых скважин в США – 30-40 лет, то сланцевых скважин значительно меньше. Так, жизненный цикл последних на Barnett Shale – 8-12 лет, а около 15% скважин, пробуренных в 2003 г., исчерпали свой ресурс уже через пять лет [4].

Экологические проблемы. Экологические проблемы возникают, прежде всего, вследствие создаваемого ГРП эффекта гидравлического удара, т.е. посредством ввода в глинистые слои воды, песка и химических реагентов.

Негативное воздействие добычи сланцевого газа на окружающую среду и здоровье человека выражается в загрязнении атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, пагубном влиянии на геологическую среду (в том числе на усиление сейсмической активности), повышении радиоактивного фона, истощении земельных, биологических и водных ресурсов и др.

Основные причины рисков экологического воздействия от проведения ГРП при добыче сланцевого газа [5] следующие.

1. Использование более значительных объемов воды и химикатов по сравнению с традиционной добычей газа.

2. Более низкая производительность скважин для добычи сланцевого газа по сравнению с обычными газовыми скважинами.

3. Обеспечение целостности скважин и другого оборудования на всех этапах его эксплуатации для предупреждения риска загрязнения поверхностных и грунтовых вод.

4. Предотвращение разливов химикатов и сточных вод.

5. Потенциальные неопределенности, связанные с долгосрочным присутствием жидкости гидроразрыва в подземном пространстве.

6. Потенциальная токсичность химических добавок в растворе для ГРП.

7. Освоение более обширных территорий, чем при добыче традиционного газа.

Многие данные свидетельствуют о серьезности экологических факторов [6-8]. Тот факт, что ГРП сопровождается *загрязнением атмосферного воздуха*, однозначно подтвержден в США. Согласно исследованиям [6], 37% летучих химикатов, применяемых при ГРП, несут угрозу здоровью населения, причем в наибольшей степени подвержено население, проживающее в радиусе полумили (примерно 800 м) от скважин.

Эмиссия вредных газов при ГРП классифицируется следующим образом:

– от водоемов для отработанных растворов и противотока (flowback) после осуществленного гидравлического разрыва;

– от грузовых автомобилей и бурового оборудования (пылевые частицы, SO_x , NO_x , NMVOC и CO);

– от переработки и транспортировки (пылевые частицы, SO_x , NO_x , NMVOC и CO);

– при работе бурового оборудования (пылевые частицы, SO_x , NO_x , NMVOC и CO).

Эмиссия самого сланцевого газа также существенно влияет на окружающую среду, так как это парниковый газ. По оценкам экспертов, примерно 3% всего объема добычи от одной скважины уходит в атмосферу; по данным [9] общий объем потерь метана при добыче газа составляет 3,6-7,9%.

В последнее время много внимания уделяется «углеродному следу».

Специфические эмиссии парниковых газов, образующиеся при бурении, в существенной степени зависят от объема добываемого природного газа. В то же время объем образующегося CO_2 при бурении зависит от глубины скважины. Кроме того, чем меньше добыча природного газа в конкретной скважине, тем больше выбросы парниковых газов на МДж извлеченного природного газа. Так, на месторождении Хейнсвилл в Луизиане установлено, что в течение срока эксплуатации одной скважины [9] выделяется порядка 210 млн. куб. м эмиссий, что значительно превышает выбросы в других подобных месторождениях сланцевого газа. По мнению других исследователей [10], среднее значение эмиссий за период эксплуатации одной скважины в Хейнсвилл составляет 75 млн. куб. м. Несмотря на очевидную разницу приведенных оценок, если принять нижнюю границу показателя за равную 75 млн. куб. м и эмиссию от противотока постоянными величинами, то специфические выбросы метана достигают 9%.

Возможны случаи утечки метана в грунтовые воды. Например, анализ водных источников, расположенных над сланцевыми формациями Марселлус (Северо-Восточная Пенсильвания) и Ютика (Utica) (Северный Нью-Йорк), показал загрязнение питьевой воды метаном, которое связывают с проведенным в них гидравлическим разрывом [11].

Данные исследования выброса метана при добыче сланцевого газа приводятся во многих работах (см. [12-15]). Как отмечается в [13], природный газ, попадающий в атмосферу при ГРП, может быть гораздо вреднее, чем при добыче угля из-за метановых утечек в воздух. В итоге основные выводы исследования [13] таковы: самый большой объем выбросов при добыче сланцевого газа происходит на этапе ГРП; при добыче сланцевого газа на протяжении эксплуатационного цикла

скважины от 3,6% до 7,9% объема метана уходит в атмосферу в результате продувок или утечек; выбросы, связанные со сланцевым газом, вдвое выше аналогичного показателя при добыче угля.

Одним из самых главных отрицательных экологических факторов добычи сланцевого газа является загрязнение *поверхностных и подземных вод растворами*, используемыми при разведке, добыче (в том числе в процессе ГРП) и транспортировке сланцевого газа.

Возможность реализации данных сценариев при добыче сланцевого газа подтверждена в докладе [16]. В то же время в нем отсутствует однозначное официальное мнение американского Агентства по охране окружающей среды (ЕРА) о данной проблеме, т.е. подчеркивается, что небольшой временной период проводимых исследований и неполная информация недостаточны для таких выводов.

В Европе в отличие от США глубина расположения газоносных слоев сланцевых пластов неоднородна и зависит от гео- и гидрогеологических характеристик территории. В исследовании, опубликованном Британским институтом геологических исследований и Агентством охраны окружающей среды Великобритании [17], показано, что, при разрыве слоя, отделяющего воду от газа, крупные объемы метана смешиваются с водой, что может привести к многократному превышению его допустимой концентрации в питьевой воде и негативным последствиям для здоровья людей.

Химические добавки составляют около 0,5% жидкости, используемой для ГРП. Токсичность многих из них подтвердила ЕРА, идентифицировав те химикаты, которые могут потенциально оказать негативное воздействие на здоровье человека [18]. Концентрация части химикатов, входящих в ее состав, превышает ПДК. Так, в закачиваемых с 2000 г. в Германии жидкостях для разрыва применяют составы с присадками, которые обладают опасными свойствами (среди прочего – очень ядовитые, канцерогенные, мутагенные и (или) токсичные). По оценке немецких ученых, применявшиеся в Европе жидкости для ГРП имеют высокий потенциал опасности для человека [19].

Сравнительный анализ потенциального воздействия на водные ресурсы приведен в таблице.

Таблица

Потенциальное воздействие на водные ресурсы по стадиям разработки и добычи сланцевого газа и видам производимых работ

| Стадия работ | Возможное загрязнение поверхностных и подземных вод и другие риски по видам работ |
|---|--|
| Выбор и подготовка места добычи | Сток и эрозия во время строительных работ на объекте может привести к накоплению ила в поверхностных водах. |
| Проектирование скважины | Неадекватная конструкция может привести к загрязнению водоносного горизонта. Риск загрязнения через обсадку при недостаточной глубине и/или качестве. |
| Бурение скважин, обсадка и цементование | Недостаточный контроль процесса бурения и связанных с ним буровых отходов, неадекватное качество обсадки или ее глубина и некачественное цементование могут привести к загрязнению подземных или поверхностных вод при гидроразрыве, обратном притоке и производстве газа. |
| Гидроразрыв | В результате операций ГРП загрязняющие жидкости могут попасть в водоносные горизонты через геологические разломы. Риски могут возникнуть из-за жидкости для ГРП, химических веществ, загрязняющих веществ в пластовой воде и (или) миграции газа. |
| Добыча в скважине | Риски, связанные с недостатками или ненадлежащим проектированием обсадной колонны, ведущие к потенциальному загрязнению водоносного горизонта. Поверхностные разливы или проливы пластовых флюидов во время хранения на месте. |
| Консервация работ на скважине/площадке | Недостаточная герметизация скважины может привести к появлению подземных путей миграции загрязняющих веществ, что приведет к загрязнению грунтовых вод. |

Агентство по охране окружающей среды Великобритании проанализировало состав возвратной воды из разведочной скважины компании Cuadrilla Resources Ltd [17]. В результате были выявлены высокие уровни натрия, хлоридов, бромидов и железа, а также повышенные значения свинца, магния, цинка, хрома и мышьяка по сравнению с водой, которая закачивалась в породу для ГРП.

Потенциальный риск *радиоактивного загрязнения* поверхностных и грунтовых вод связан, прежде всего, с природными радиоактивными материалами – в частности, ураном, торием и радием, – которые вместе с обратным потоком жидкостей выводятся на поверхность, что приводит к формированию высокого уровня гамма-излучения.

В исследовании Министерства охраны окружающей среды Пенсильвании (DEPPA) [19] указывается, что потенциальный наибольший риск воздействия радионуклидов природного происхождения на человека отмечен для работников предприятий по переработке сланцевого газа, а наибольшее потенциальное воздействие на окружающую среду – при утечке и разливе буровых растворов и попадании радионуклидов природного происхождения в поверхностные и подземные воды.

Согласно мнению немецких ученых, подъем (с возвратными) глубоких подземных вод, содержащих естественные радиоактивные вещества, приводит к их попаданию в поверхностные грунтовые воды [19]. Анализ возвратной воды из разведочной скважины (Cuadrilla Resources Ltd), выполненный Агентством по окружающей среде Великобритании, показал наличие в ней ряда радионуклидов природного происхождения, в том числе ^{40}K , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{228}Ac и ^{226}Ra [17]. Приводятся данные о мощности доз радиоактивных веществ от загрязненного оборудования от 0,3 до 0,6 мкЗв ч⁻¹, т.е. она может достигать 5-кратного превышения по сравнению с естественным фоном [20]. Радон и радий растворимы в воде, поэтому при утечке обратной буровой жидкости существует риск их перорального попадания в организм из системы водоснабжения через грунтовые воды.

Потенциальное воздействие добычи сланцевого газа на геологическую среду и сейсмическую активность в районах добычи. Основное воздействие на геологическую среду при добыче сланцевого газа заключается в нарушении целостности недр, что вызывает оползни и техногенные землетрясения. Институтом US Geological Survey доказано, что в сравнении с двадцатым столетием количество и частота землетрясений в континентальной части США в начале двадцать первого века из-за ГРП увеличилась в шесть раз, а магнитуда землетрясений, связываемых с ГРП, составляла до 2,4 шкалы Рихтера и выше [20].

Различие геологических структур Северной Америки и Европы является ключевым аргументом против использования ГРП в Европе. Так, в Чешской Республике добыча предполагается, главным образом, в областях тектонически активных или имеющих тектонические дефекты, что представляет потенциальный значительный риск [7].

Выделяют два типа наведенной сейсмической активности, связанной с ГРП [5]. Сам процесс ГРП может привести к подземным толчкам силой порядка трех баллов по шкале Рихтера. Второй тип сейсмической активности является результатом закачки сточных вод, достигающих имеющихся геологических разломов, что может привести к более значительным подземным толчкам. Такие толчки не происходят непосредственно на месте добычи сланцевого газа, т.е. опасны для территорий на значительных от нее расстояниях.

Добыча нетрадиционного газа оказывает *влияние на биоразнообразие* и, в результате строительства объектов инфраструктуры и собственно буровых площадок, может привести к деградации или полному исчезновению естественной среды обитания вследствие чрезмерного забора воды, дробления ареалов распространения диких животных и растений, деградации почв и др. Так, отрицательное воздействие факелов

при сжигании газа распространяется на территорию, в 3-4 раза превышающую площадь отвода земельного участка, на ней уничтожается древостой, ухудшается качество почвы.

Эти выводы подтверждают и результаты исследований EPA, доказавших, что продолжение добычи сланцевого газа в регионах Barnett и Marcellus может привести к значительному воздействию на водные экосистемы северо-востока Соединенных Штатов [16].

Основными видами воздействия добычи сланцевого газа на земельные ресурсы являются:

- деградация почв (ущерб вследствие удаления верхнего слоя почвы);
- уплотнение почвы в результате постоянной нагрузки (восстановление первоначального состояния является сложным и долгосрочным);
- загрязнение в случае аварии разлившимися жидкостями и горюче-смазочными материалами.

Исследование, проведенное DEPPA в Пенсильвании, также указывает на возможность накопления в почвах радия [21].

Помимо изъятия земель для размещения скважин и оборудования, дополнительные площади земель, которые потребуются во время повторных операций ГРП, сопоставимы с площадью, используемой в Европе в настоящее время под жилье, объекты промышленности и транспорта (4% земель). Следовательно, этот факт потенциально ограничивает значение добычи сланцевого газа, особенно в густонаселенных регионах Европы.

Еще одной проблемой при развитии добычи газа из нетрадиционных источников в промышленных масштабах является необходимость значительной компенсации владельцам сельскохозяйственных земель за потери урожаев и возможное уменьшение площади полей, что оказывает *более мощное воздействие на ландшафт*, чем в случае добычи углеводородов из традиционных месторождений.

Перспективы добычи сланцевого газа в Европе. Предполагаемые места добычи сланцевого газа в Европе различны по размеру территории добычи, водным ресурсам, структуре, геологическим и прочим особенностям, что дополнительно к неоднозначным (а часто и противоречивым) данным о влиянии добычи сланцевого газа в США на окружающую среду не позволяют выработать единое мнение о целесообразности его добычи.

Для более точного представления о ресурсах сланцевого газа в Европе потребуются кардинальные изменения подходов к ведению поисково-разведочных работ, бурению оценочных скважин и оценке технически извлекаемых запасов сланцевого газа. При этом на практике лишь малая доля этих запасов может в будущем оказаться рентабельной для целей промышленной добычи.

Серьезные экологические проблемы в густонаселенной Европе будут иметь решающее значение для принятия решения о целесообразности добычи сланцевого газа.

Перспективы добычи сланцевого газа в России. Ресурсы нетрадиционного газа в сланцевых формациях России, по оценкам ВНИИГаз, составляют от 20 до 100 трлн. куб. м, а по оценкам ВНИГРИ, для трех основных сланцевых формаций России – 33,3 трлн. куб. м. Приводимые характеристики ресурсной базы в Российской Федерации являются приблизительными из-за недостаточной изученности территории (в первую очередь для углубленного бурения) и отсутствия специальных научных исследований сланцевых массивов как объекта эксплуатации.

Технология ГРП не является новой для России, она активно с 1952 г. применялась в СССР, однако после открытия крупных нефтегазовых месторождений практически отпала необходимость искусственно увеличивать дебит скважин.

На фоне резкого развития сланцевой отрасли в США в начале XXI в. ведущие российские компании («Роснефть», «ЛУКОЙЛ», «Газпром нефть», «Татнефть» и др.) начали активно создавать совместные предприятия с зарубежными партнерами: Shell, Total, ExxonMobil и т.д. К 2014 г. количество скважин с ГРП в России составило несколько десятков, при этом за период 2011-2014 гг. оно увеличилось втрое.

В целом отсутствие в РФ предпосылок для активного промышленного освоения нетрадиционных источников газа в ближайшие годы предопределяется, прежде всего, отсутствием дефицита источников природного газа из традиционных месторождений и экономической обоснованностью их разработки. Немаловажную роль при этом играют и экологические факторы.

Выводы. В современных условиях вопрос о разведке и добыче сланцевого газа, возможных перспективах и рисках широкомасштабной добычи сланцевого газа в Европе рассматриваются исходя из более чем 10-летнего опыта эксплуатации скважин в США. На основе анализа фактических данных и научных работ можно сделать следующие выводы:

1. Негативное воздействие на окружающую среду в процессе добычи сланцевого газа значительно больше, чем в случае добычи газа из традиционных газовых месторождений.
2. Наиболее значимым негативным фактором является загрязнение подземных и поверхностных вод высокотоксичными компонентами водных растворов, используемых при ГРП (мышьяком, бензолом и др.).
3. Широкомасштабная добыча сланцевого газа потребует изъятия из оборота значительных площадей земельных ресурсов. Для многих потенциальных регионов добычи в Европе они совпадают с районами интенсивного экономически эффективного сельскохозяйственного производства, использующего водные ресурсы.
4. Добыча сланцевого газа сопровождается повышенным уровнем загрязнения воздуха токсическими веществами и эмиссией парниковых газов.
5. Значительным негативным фактором может быть нарушение геологической среды в результате ГРП.
6. В районах добычи сланцевого газа наблюдается повышение радиоактивного загрязнения. Это связано с обратным потоком жидкости из глубоких пластов. В районах добычи естественный радиоактивный фон повышается до пяти раз. В зависимости от глубины скважин и геологического строения повышение радиоактивного фона может стать критическим фактором.
7. В целом, выявленные значительные отличия, прежде всего по природным и социально-экономическим условиям добычи сланцевого газа в США и Европе усиливают риск негативного воздействия на окружающую среду в густонаселенных районах Европы.

Литература

1. Sheila M. Olmstead, Lucija A. Muehlenbachs, Jhih-Shyang Shih, Ziyang Chu and Alan J. Krupnick. *Shale Gas Development Impacts on Surface Water Quality in Pennsylvania*. PNAS, 2013, 110 (13). pp. 4962-4967. <https://doi.org/10.1073/pnas.1213871110>
2. *Сланцевый газ в Европе: революция или эволюция? Эрнст энд Янг (СНГ) Б.В.* 2014. 20 с.
3. *Американские компании закрыли 2/3 всех буровых вышек в США: ТАСС информационное агентство.* 18.02.2016. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://tass.ru/ekonomika/2658252>
4. U.S. Energy Information Administration (EIA), *Annual Energy Outlook 2012*, DOE/EIA- 0383(2012) (Washington, DC, June 2012). [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.eia.gov/forecasts/archive/aeo12/>.
5. *Support to the Identification of Potential Risks for the Environment and Human Health Arising from Hydrocarbons Operations Involving Hydraulic Fracturing in Europe*. Ref: AEA/ED57281/Issue Number 17/ Dr Mark Broomfield, AEA Technology, 11 February 2013. 292 p.

6. Theo Colborn, Carol Kwiatkowski, Kim Schultz, Mary Bachran. *Natural Gas Operations from a Public Health Perspective. International Journal of Human and Ecological Risk Assessment*, 2010, 17 (5). pp. 1039-1056. <https://doi.org/10.1080/10807039.2011.605662>
7. Маушалка Й., Малик Й. и др. *Сланцевый газ. Энергетическая перспектива или грязное дело? (Пер. с чешского)*, 2013. Teplice nad Metuji. Brusel. 2013. 58 p.
8. *DEP Reaches Agreement with Cabot to Prevent Gas Migration, Restore Water Supplies in Dimock Township. Pennsylvania. PA-DEP Daily News Releases*, 4 November 2009.
9. Howarth R.W., Santoro R. and Ingraffea A., 2011, *Methane and the Greenhouse Gas Footprint of Natural Gas from Shale Formations. Climatic Change*, 106:679-690. DOI: 10/1007/s10584-011-0061-5.
10. Cook T., Troy P., Charpentier R., 2010, *Assembling Probabilistic Performance Parameters of Shale-Gas Wells: US-Geological Survey Open File Report 2010-1138*. 19 p.
11. Osborn S.G., Vengosh A., Warner N.R., Jackson R.B., 2011, *Methane Contamination of Drinking Water Accompanying Gas-Well Drilling and Hydraulic Fracturing. Proceedings of the Natural Academy of Science*, v. 108, pp. 8172-8176.
12. Francis O'Sullivan, S. Paltsev. *Shale Gas Production: Potential Versus Actual Greenhouse Gas Emissions. Environmental Research Letters*. 7:1-6 November 2012.
13. Howarth R., Ingraffea A. and Engelder T. *Natural Gas: Should Fracking Stop? Nature*, 2011, 477 (7364). pp. 271-275. doi: 10.1038/477271a
14. Hultman N., Rebois D., Scholten M. and Raming C. *The greenhouse gas impact of unconventional gas for electricity generation. Environmental Research Letters*, 2011, 6 (044008). pp. 1-9. doi:10.1088/1748-9326/6/4/049504
15. Terence H. Thorn. *Environmental Issues Surrounding Shale Gas Production. The U.S. Experience. A Primer. International Gas Union. April 2012*. 68 p. http://www.newgas.org.ua/sites/default/files/analytics/2012-Apr_IGU%20Environmental%20Issues%20and%20Shale%20Gas.pdf
16. U.S. EPA. *Assessment of the Potential Impacts of Hydraulic Fracturing for Oil and Gas on Drinking Water Resources (External Review Draft)*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-15/047, 2015. 998 p.
17. *Principles for the Assessment of Prospective Public Doses arising from Authorised Discharges of Radioactive Waste to the Environment. Environment Agency, August 2012*. 55 p.
18. U.S. EPA. *Compilation of Physicochemical and Toxicological Information About Hydraulic Fracturing-Related Chemicals (Draft Database)*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-15/134, 2015.
19. *Fracking in unkonventionellen Erdgas-Lagerstätten in NRW Kurzfassung zum Gutachten. 7 September 2012. Gutachter/Auftragnehmer: ahu AG Wasser (Dr. H. Georg Meiners, Dr. Michael Denneborg, Frank Müller), Brenk Systemplanung GmbH (Dr. José B. Pateiro Fernández, Dr. Guido Deißmann, Dr. André Filby, Dr. Rainer Barthel, Thomas Cramer), IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH (Dr. Axel Bergmann, Dr. Carsten Hansen, Dr. Frank-Andreas Weber, Prof. Dr. Elke Dopp, Prof. Dr. Christoph Schüth)*. September 2012. 31 p.
20. Green Christopher A., Styles Peter, Baptie Brian J. *Preese Hall shale gas fracturing. Review & recommendations for induced seismic mitigation. Department of Energy & Climate Change, April 2012*. 26 p.
21. *PA DEP (Pennsylvania Department of Environmental Protection). Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials (TENORM) study report. Harrisburg, PA, Pennsylvania Department of Environmental Protection, 2016*. 203 p.