

НАУКА ЗА РУБЕЖОМ

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ РАЗВИТИЯ НАУКИ РАН

ЭНЕРГЕТИКА США И «СЛАНЦЕВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ»



Наука за рубежом

№39, март 2015

Ежемесячное обозрение

Электронное издание:

www.issras.ru/global_science_review

Рубрика **«Энергетика и транспорт»**

Обзор выполнил **Н. А. Трофимов**

Выпускающее подразделение: **Сектор анализа зарубежной науки**

Руководитель проекта **Л. К. Пипия**

Редактор **О. Е. Осипова**

Верстка: **Н. В. Шашкова**

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Текущее состояние энергетической отрасли США	5
2. Нетрадиционная добыча нефти и газа и экологические риски	10
ПРИЛОЖЕНИЕ	13
Рис. 1. Схема залегания сланцевого газа	13
Рис. 2. Общий объем первичного энергопотребления в США: 1973–2013	14
Рис. 3. Производство электроэнергии в США по источникам: 1973–2013	15
Рис. 4. Доля возобновляемой энергии в первичном энергопотреблении в странах – членах Международного энергетического агентства: 2013	16
Рис. 5. Импорт США сырой нефти, сжиженного газа и других углеводородов по странам происхождения: 2013	17
Рис. 6. Производство сырой нефти в США	17
Рис. 7. Разрабатываемые месторождения сланцевого газа в США	18
Таблица. Бюджет Министерства энергетики США на научные цели	19

За прошедшее десятилетие в США значительно преобразованы как сама энергетическая отрасль, так и система регулирования национальной энергетики. В случае сохранения намеченных тенденций американская энергетика практически может стать полностью самодостаточной к 2035 г. Бум сланцевого газа и экономически выгодное производство легкой нефти стали возможными благодаря новым технологиям добычи углеводородов. Эти технологии уже сегодня в значительной степени изменили мировой рынок энергоносителей. Сланцевая революция оказала заметное влияние на экологию. Учитывая глобальный дефицит пресной воды, а также тесную взаимосвязь пресноводных экосистем, по-видимому, важно более тщательно оценивать вероятные последствия нарушения хрупкого природного равновесия в кругообороте воды при использовании технологий нетрадиционной добычи нефти и газа.

Введение

В декабре 2014 г. Международное энергетическое агентство ОЭСР (IEA) опубликовало очередной аналитический отчет, посвященный развитию энергетической отрасли в США [1]. Нефть по-прежнему остается основным источником энергии, на ее долю в стране приходится 36% первичного энергопотребления. Внутренняя добыча нефти в 2013 г. выросла по сравнению с 2012 г. на 13%, что приблизило США к крупнейшим производителям нефти – Саудовской Аравии и России. Также Америка вышла на второе после России место в экспорте нефтепродуктов. Кроме того, в 2012 г. США опередили Россию по производству природного газа.

Эксперты ОЭСР предполагают, что бум добычи легкой нефти из низкопроницаемых коллекторов (LTO¹), с чем во многом связано текущее возрождение нефтяной индустрии, будет продолжаться до 2020 г. Затем этот вид нефтедобычи станет экономически менее привлекательным. Доказанные запасы природного газа в США по сравнению с 2000 г. увеличились на три четверти и составили 9,1 трлн м³. Этого объема достаточно для поддержания текущего уровня потребления природного газа на ближайшее столетие. Предполагается, что в обозримом будущем США станут лидирующим поставщиком сжиженного газа во многом благодаря разрешению

¹ От англ. light tight oil.

Министерства энергетики экспортировать этот вид топлива в страны, с которыми у США нет соглашения о свободной торговле.

Добыча сланцевого газа в США за период с 2007 по 2013 г. выросла с 45 до 264 млрд м³. Однако в последнее время рост несколько замедлился, что вызвано переориентацией технологий нетрадиционной добычи углеводородов² с залежей сланцевого газа на месторождения легкой нефти. Нетрадиционные способы добычи нефти и газа в США (рис. 1), по всей видимости, будут вызывать растущее общественное недовольство ощутимыми экологическими последствиями сланцевых разработок, и прежде всего для пресноводных экосистем. Однако пока экономическая выгода землевладельцев перевешивает экологические протесты.

Вместе с тем производство сланцевого газа ведет не только к огромному расходованию пресной воды, но и ставит под угрозу качество питьевой воды в том случае, когда очистка отработанных вод проводится недостаточно качественно. Нефтяной бум в США также стал причиной значительной перегрузки для транспортной инфраструктуры. В связи с тем, что в США не хватает нефтепроводов, а в ряде случаев их пропускная способность недостаточна, дополнительная нагрузка легла на железнодорожную транспортную систему. Это уже привело к экологическим катастрофам, а также к инцидентам на железной дороге, некоторые из которых были вызваны необычными горючими и летучими свойствами нефти формации Баккен³, а также нехваткой специальных железнодорожных цистерн.

1. Текущее состояние энергетической отрасли США

Общее первичное энергопотребление в США по итогам 2013 г. составило 2186,7 млн т в нефтяном эквиваленте (рис. 2). Почти 36% приходится на нефть, далее в порядке убывания следуют газ (27,8%), уголь (19,9%) и ядерная энергия (9,8%). Замыкает список возобновляемая энергия, в том числе биотопливо и отходы (4,2%) и гидроэнергия (1,1%). Ветряная,

² Нетрадиционная разведка и добыча нефти и газа (от англ. Unconventional oil and gas exploration and recovery) – технология разведки и добычи нефти (газа), распределенной в порах и трещинах горных пород, в том числе в сланцах, или адсорбированной органическими веществами.

³ От англ. Bakken Shale.

геотермальная и солнечная энергия в общей картине энергопотребления играют незначительную роль. При этом внутреннее производство энергии позволяет обеспечить около 85% национального энергопотребления⁴. Однако с учетом того, что 12% энергии в США экспортируется, энергетика страны в целом почти на треть зависит от импорта. В электроэнергетике на долю угля и природного газа приходится 67% выработки электричества (рис. 3).

Среди источников возобновляемой энергии наибольший рост за прошедшее десятилетие продемонстрировали ветряная, солнечная энергия и биотопливо и биомасса. По сравнению с показателями 2003 г. ветряная энергетика в 2013 г. выросла почти в 14 раз, а солнечная – почти вдвое. За этот же промежуток времени производство энергии биомассы и биотоплива увеличилось на 30,6%, а геотермальной энергии – на 6,2%. Примечательно, что производство гидроэнергии сократилось на 2,6%, что связано не столько с уменьшением мощностей, сколько с истощением гидроресурсов. К 2040 г. эксперты прогнозируют увеличение производства энергии биотоплива и биомассы до 7,9% от общего первичного энергопотребления и геотермальной энергии – до 2%. В целом источники возобновляемой энергии обеспечат лишь 16% суммарного производства электроэнергии в 2040 г. США по-прежнему остаются одной из стран с относительно низкой долей производства «зеленой» энергии, наряду с Японией, Кореей и Великобританией (рис. 4).

Наиболее радикальные преобразования отмечены в нефтяной отрасли. Менее чем за десятилетие США превратились из крупнейшего импортера в одного из крупнейших экспортеров нефтепродуктов, уступая по объему экспорта только России. С учетом того, что США являются одновременно крупнейшим в мире производителем природного газа, жидких фракций природного газа и биотоплива, а также принимая во внимание доказанные запасы сырой нефти и газоконденсата в объеме 30,5 млрд баррелей, произошедшие изменения оказали серьезное влияние на мировой рынок углеводородов: с 2005 по 2013 г. чистый импорт нефти в США сократился с 13 до 6,7 млн баррелей в день.

⁴ По этому показателю США уступают только Китаю. Производство энергии в США оценивается в 1850 млн т в нефтяном эквиваленте.

Почти половину американского импорта углеводородов обеспечивают Канада и Саудовская Аравия (рис. 5). В то же время значительно выросла добыча нефти внутри страны, подскочив на 75% за период с 2008 по 2013 г. (рис. 6). Впечатляет динамика роста добычи легкой нефти практически с нулевого уровня в 2005 г. до 4 млн баррелей в день в середине 2014 г.

Эксперты ОЭСР возлагают большие надежды на то, что в ближайшее десятилетие США выйдут на лидирующие позиции в мировом экспорте сжиженного газа. В настоящее время получено разрешение на экспорт в те страны, с которыми у США нет действующих соглашений о свободной торговле, в объеме 80 млн т в год. Для сравнения: крупнейший экспортер сжиженного газа на сегодняшний день – Катар производит 77 млн т в год. В США расширяется география добычи сланцевого газа, доля которого предположительно должна вырасти с текущих 40 до 53% в 2040 г. (рис. 7).

Согласно прогнозам, потребление природного газа в транспортном секторе вырастет с текущего уровня 43 трлн до 863 трлн БТЕ⁵ в 2040 г. В то же время доля легковых автомобилей на природном газе в США остается незначительной. Лишь менее 100 тыс. автомобилей оснащены оборудованием для использования сжатого газа. По мнению экспертов, законодательно установленные налоговые вычеты на приобретение автотранспортных средств на сжиженном или сжатом газе, а также налоговые вычеты на газовое топливо в размере 0,5 долл. США в пересчете на эквивалентный галлон бензина должны способствовать постепенному распространению легкового и грузового транспорта, работающего на природном газе. Ключом к достижению поставленных целей остается развитие заправочной инфраструктуры, прежде всего заправочных станций сжиженного газа, возведение которых обходится сравнительно дорого. К тому же грузовики на сжиженном газе будут иметь запас хода до 700 миль, в то время как их современные дизельные аналоги – 1200 миль.

Достаточно успешно выполняется государственная федеральная программа США, направленная на внедрение стандарта для горючих смесей, полученных на базе возобновляемых источников, например продукции и отходов биомассы. В то же время не предвидится повышение

⁵ Британская термальная единица.

рекомендованной стандартом доли содержания этанола в бензиновых горючих смесях свыше 10%. Это отчасти связано с сокращением потребления бензиновых смесей. Более серьезные проблемы возникли в биодизельной отрасли. В конце 2013 г. были отменены налоговые вычеты в размере 1 долл. США на галлон горючей смеси на основе биодизеля, что, вероятно, в среднесрочной перспективе приведет к снижению объемов производства биодизеля с текущих 87 до 84 тыс. баррелей в день.

Благодаря введению более строгих нормативов для выбросов легкового автотранспорта⁶ планируется сэкономить более 6 млрд баррелей нефти за время эксплуатации автомобилей, выпущенных в период 2012–2024 гг. К 2015 г. предполагается обеспечить функционирование необходимой инфраструктуры и производственных мощностей для выпуска порядка 1 млн гибридных автомобилей и электромобилей в год.

Ядерная энергетика США – крупнейшая в мире. Начиная с 1990-х годов на ее долю неизменно приходится около 19% производимой в стране электроэнергии. По состоянию на 2013 г. в США насчитывалось 100 действующих реакторов с общим объемом выработки электроэнергии 822 ГВт·ч. Обогащение урана ведется под руководством образованной в 1993 г. компании USEC⁷. В том же году стартовала программа «От мегатонн к мегаваттам»⁸ в рамках Соглашения ВОУ-НОУ⁹ между США и Россией. К 2013 г. 14 тыс. метрических тонн низкообогащенного урана были получены и коммерциализированы из 500 метрических тонн российского высокообогащенного урана, что приблизительно соответствует массе, требующейся для производства более 20 тыс. ядерных боеголовок. Эксперты ОЭСР также отметили приостановку программы утилизации ядерных отходов, произошедшую после того, как планы по размещению отработанного ядерного топлива в глубоком подземном репозитории Юкка-Маунтин были отменены.

⁶ Введенные в 2011 г. стандарты повышают требования к показателю экономии топлива до 54,5 миль на галлон в сравнении с предыдущим показателем 35 миль на галлон.

⁷ От англ. United States Enrichment Corporation – Корпорация Соединенных Штатов по обогащению урана. Преобразована в 1993 г. из государственного предприятия в частную компанию, которая де факто осталась полностью подчиненной правительству США.

⁸ От англ. Megatons to Megawatts programme.

⁹ Межправительственное соглашение России и США ВОУ-НОУ (высокообогащенный уран – низкообогащенный уран) заключено в Вашингтоне 18 февраля 1993 г.

Правительство США последовательно поощряет научные исследования и разработки в области энергетики. В 2014 г. Министерство энергетики США запросило на научные цели более 5 млрд долл. США (таблица). В 2013 г. общий бюджет правительства США на исследования и разработки в области энергетики составил около 7 млрд долл. США. Значительная часть этого бюджета в основном связана с исследованиями в области ядерной физики и физики высоких энергий.

С целью проведения передовых исследований и разработок в области биоэнергетики Министерство энергетики США в 2007 г. основало три научных центра¹⁰. Для обеспечения биоэнергетического производства в промышленных масштабах необходимо решить три важнейшие научные задачи: а) разработать биоэнергетические растения нового поколения; б) усовершенствовать энзимы и микробы, способные ускоренно разлагать биомассу, и открыть новые; в) разработать трансформационные стратегии производства биотоплива с помощью микроорганизмов.

В современных системах управления электрическими сетями в США все шире используются новейшие компьютерные технологии, «умные» устройства, такие как «умные» счетчики и устройства силовой электроники и сенсоры, а также коммуникационные технологии. Одним из результатов такой трансформации традиционных электросетей стало повышение требований к кибербезопасности. Это касается не только стандартных условий информационной безопасности, но и уникальных, специфичных требований для современных технологий «умных» электросетей. Функциональность и уязвимость электросетей нового поколения проверяется в Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории¹¹ с использованием методов стохастического и вероятностного моделирования, а также симуляции в реальном времени. Национальный институт

¹⁰ Биоэнергетический центр в Национальной лаборатории Ок-Ридж (штат Теннесси), Биоэнергетический центр в Университете Висконсин и Биоэнергетический институт в Национальной лаборатории Лоуренса в Беркли.

¹¹ Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория (Pacific Northwest National Laboratory) – одна из десяти научно-исследовательских баз Министерства энергетики США. Лаборатория осуществляет передовые прикладные исследования, направленные в том числе на обеспечение национальной безопасности в таких вопросах, как кибербезопасность, нераспространение оружия массового поражения. Также здесь проводятся исследования в области водородной энергетики и биотоплива на базе биомассы.

стандартов и технологий (NIST) подготовил для основных игроков на рынке электроэнергии США руководство по выявлению вероятных рисков и уязвимости сетей с рекомендациями по их предупреждению и устранению.

Существенное увеличение доли электромобилей на рынке возможно исключительно в случае успешных разработок в области новых технологий сохранения и преобразования электроэнергии. Новые усовершенствованные батареи, разработка которых ведется в центрах, финансируемых Министерством энергетики США, предстоит произвести с минимальными издержками из наиболее распространенных химических элементов и материалов. Они также должны быть миниатюрнее и легче, а срок их эксплуатации необходимо увеличить.

2. Нетрадиционная добыча нефти и газа и экологические риски

По предварительным оценкам, в недрах земли содержится до 220 трлн м³ сланцевого газа и 195 млрд баррелей сланцевой нефти. При этом запасы сланцевого газа в США оцениваются приблизительно в 60 трлн м³, а сланцевой нефти – в 57 млрд баррелей. Однако в настоящее время разработка нетрадиционных месторождений нефти и газа не ведется за пределами США и Канады. Лишь в январе 2013 г. Китай предоставил американским компаниям права на разведку 19-ти месторождений в рамках соглашения между США и Китаем, предусматривающего передачу технологических ноу-хау.

Технология добычи сланцевой нефти заключается не только в бурении горизонтальных скважин и новых методах гидроразрыва, но и в специальных ноу-хау в области геологической разведки. Для разведки сланцевых месторождений применяются экспериментальные геологические или геофизические методы. Тем не менее одним из основных по-прежнему остается метод проб и ошибок. В связи с различными характеристиками бассейнов сланцевого газа и нефти в среднем требуется от 500 до 1500 пробных и разведывательных скважин для выяснения геологических особенностей залежей углеводородов [2]. При этом общие капитальные вложения в разработку месторождения зачастую достигают 10 млрд долл. США.

Коммерческая целесообразность сланцевых разработок напрямую зависит от геологических особенностей месторождения, наличия достаточного количества пресной воды в непосредственной близости, а также от стоимости обработки и очистки сточных вод. По оценкам Министерства энергетики США, от 2 до 6 млн галлонов воды требуется для осуществления гидроразрыва в стандартной горизонтальной скважине. Зачастую изъятие столь значительных объемов воды становится причиной истощения региональной пресноводной экосистемы.

Нерациональное расходование воды и химикатов, используемых для гидроразрыва, ведет к загрязнению не только подземных вод, но и поверхностных водоемов. При этом стоимость очистки загрязненной местности может превышать экономическую отдачу от разработки месторождения. Ситуация ухудшается в связи с тем, что в США не существует единых стандартов на федеральном уровне, определяющих требования к очистке вод, загрязненных в ходе сланцевой добычи углеводородов.

Еще одним экологическим последствием является нерациональное землепользование. При сланцевых разработках обычно задействована значительная площадь земли, которая могла бы использоваться более рационально для других нужд, например для сельского хозяйства.

Техническими причинами загрязнения экосистем на поверхности чаще всего является неправильный дизайн горизонтальных скважин, а также утечка химикатов¹², углеводородов и отработанной воды, в том числе в случае их неправильного хранения. Утечку химикатов и углеводородов на глубине горизонтальных скважин еще сложнее контролировать, поскольку жидкие, но вязкие загрязняющие вещества, удерживаемые пористой структурой скалистых пластов, со временем могут просочиться и попасть в подземные воды.

По мере увеличения объемов добычи сланцевого газа в США заметно выросли и объемы аварийного сжигания¹³ в факелах газа с 2,2 до 7,1 млрд м³ за период с 2007 по 2011 г. Таким образом, США перемести-

¹² Включая утечку метана в атмосферу.

¹³ Аварийное сжигание газа происходит, например, в тех случаях, когда не существует возможности для его закачивания в резервуары или же недостаточно развита трубопроводная инфраструктура.

лись с 14-го на 5-е место в рейтинге стран, сжигающих в аварийном порядке наибольшее количество газа¹⁴.

Данные об экологических происшествиях в ходе разработки сланцевых месторождений публикуются в специализированных научных изданиях. По результатам экологического мониторинга сточных вод на месторождении Marcellus в штате Пенсильвания выявлено превышение допустимой концентрации опасных аналитов, включая барий, стронций, бромиды, хлориды и бензол [3]. Существует также угроза биологического накопления радионуклида ²²⁶Ra в местах слива сточных вод [4]. По результатам исследования экологами трех буровых площадок компании ExxonMobil в Германии отмечается загрязнение подземных вод, являющихся основным источником питьевой воды во многих странах Европы, такими опасными веществами, как ртуть, мышьяк, свинец, цинк, кадмий, а также полициклическими ароматическими углеводородами и даже радиоактивными элементами [5].

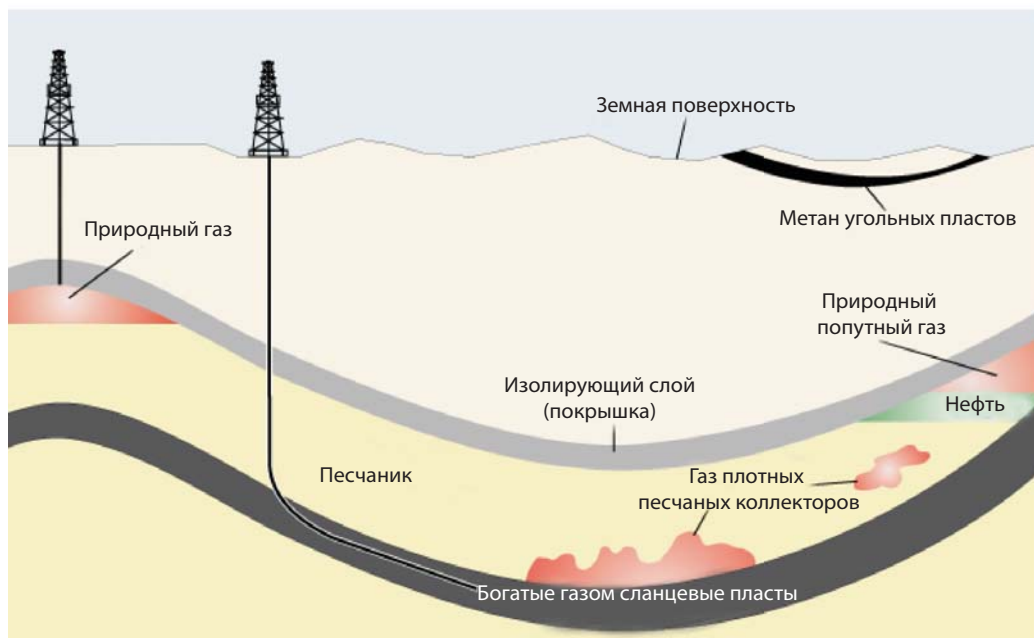
В целом экологические риски, связанные с разработкой сланцевых месторождений, в США до конца не изучены и, по всей видимости, нефтедобывающие компании пока еще не полностью выполняют экологические требования, а государство еще недостаточно регулирует эту вызывающую беспокойство общества область деятельности. В то же время было бы ошибочно полагать, что нетрадиционные методы добычи углеводородов опаснее для окружающей среды, чем традиционные¹⁵. Например, по имеющимся оценкам, объемы сточных вод приблизительно одинаковы на единицу извлеченного природного газа при его добыче как нетрадиционными, так и традиционными способами [6]. Традиционная добыча, переработка и использование углеводородов также приводят к тяжелым экологическим последствиям, способствуя изменению климата на планете. Прогресс в поиске принципиально новых источников энергии в обозримой перспективе труднодостижим, что обусловлено необходимостью решить большое количество сложных научных задач, недостаточным вниманием, уделяемым развитию науки, и недооценкой труда ученых.

¹⁴ Лидируют в этом рейтинге Россия, Нигерия, Иран и Ирак.

¹⁵ При условии, что добыча сланцевых углеводородов ведется согласно экологическим стандартам с использованием предусмотренных технологий фильтрации и очистки воды.

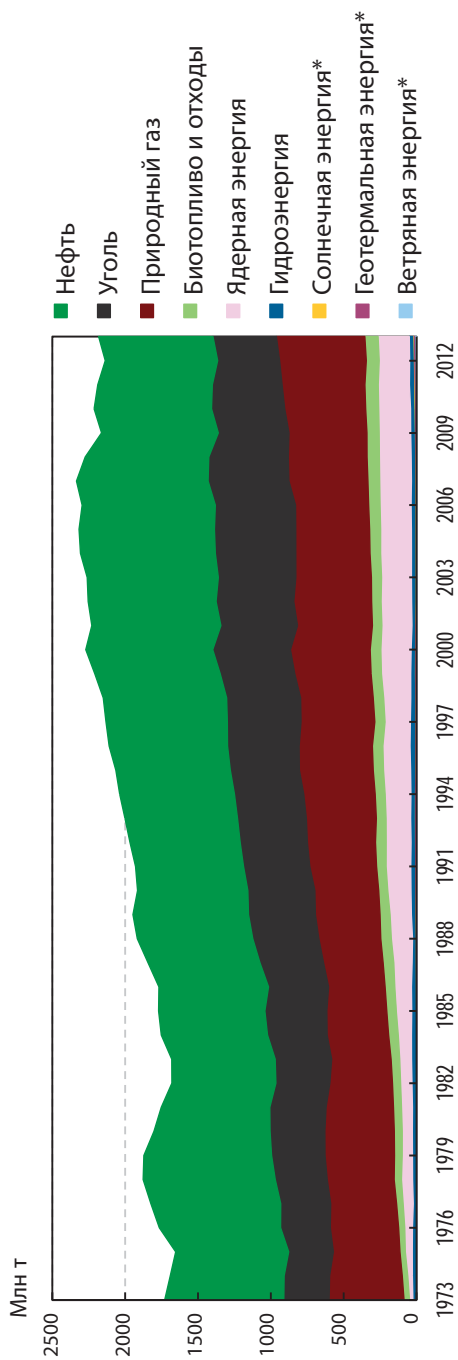
Приложение

Рисунок 1. **Схема залегания сланцевого газа**



Примечание. Сланцевый газ часто залегает на глубине от 2 до 3 миль.

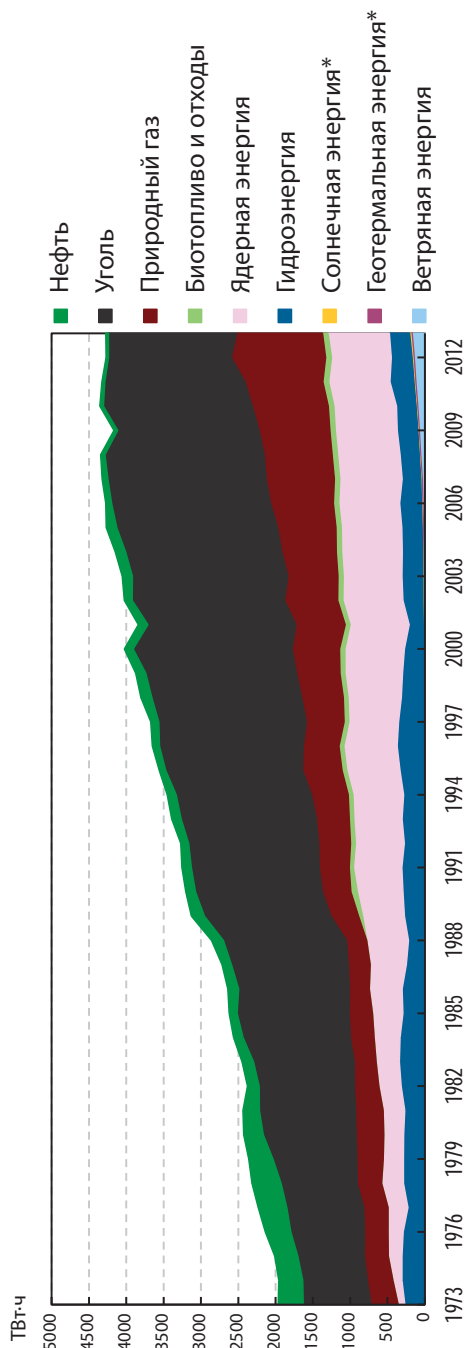
Рисунок 2. Общий объем первичного энергопотребления в США: 1973–2013
(миллионы тонн в нефтяном эквиваленте)



* Незначительный уровень.

Примечание. Для 2013 г. приведены оценочные показатели.

Рисунок 3. Производство электроэнергии в США по источникам: 1973–2013



* Незначительный уровень.

Примечание. Для 2013 г. приведены оценочные показатели.

Рисунок 4. Доля возобновляемой энергии в первичном энергопотреблении в странах – членах Международного энергетического агентства: 2013

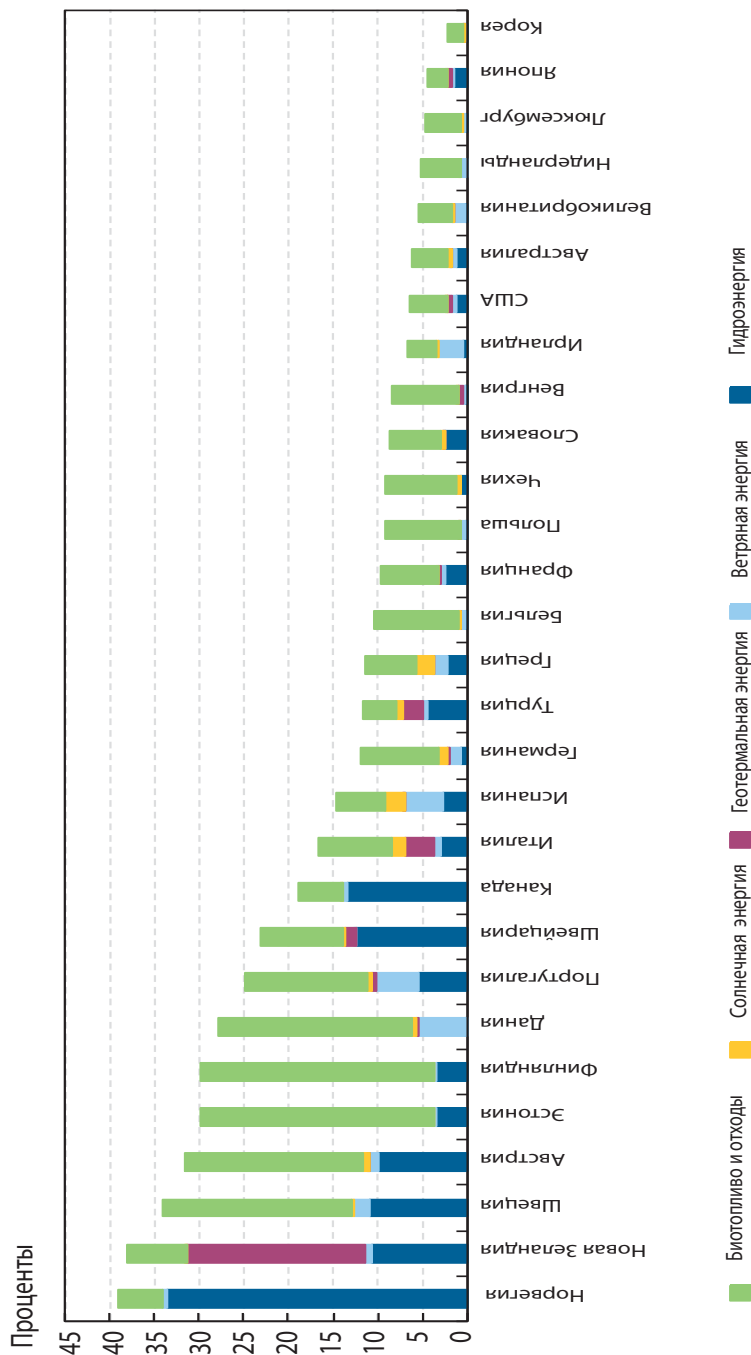


Рисунок 5. Импорт США сырой нефти, сжиженного газа и других углеводородов по странам происхождения: 2013

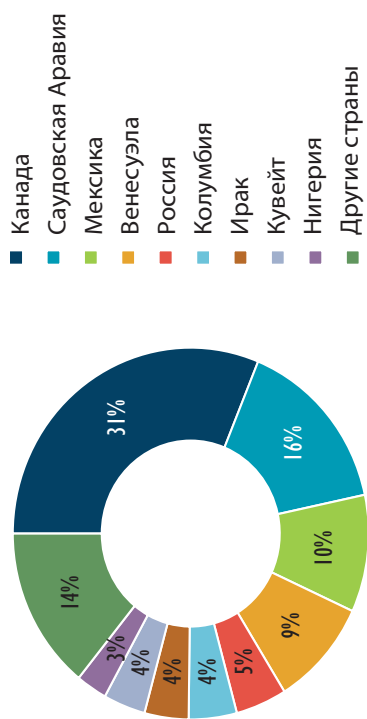


Рисунок 6. Производство сырой нефти в США

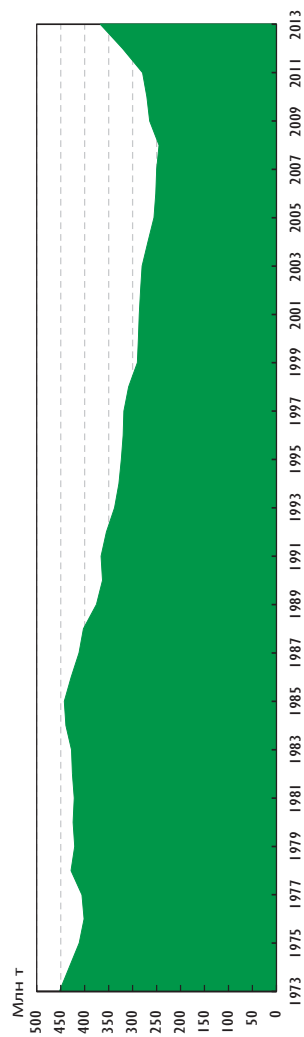
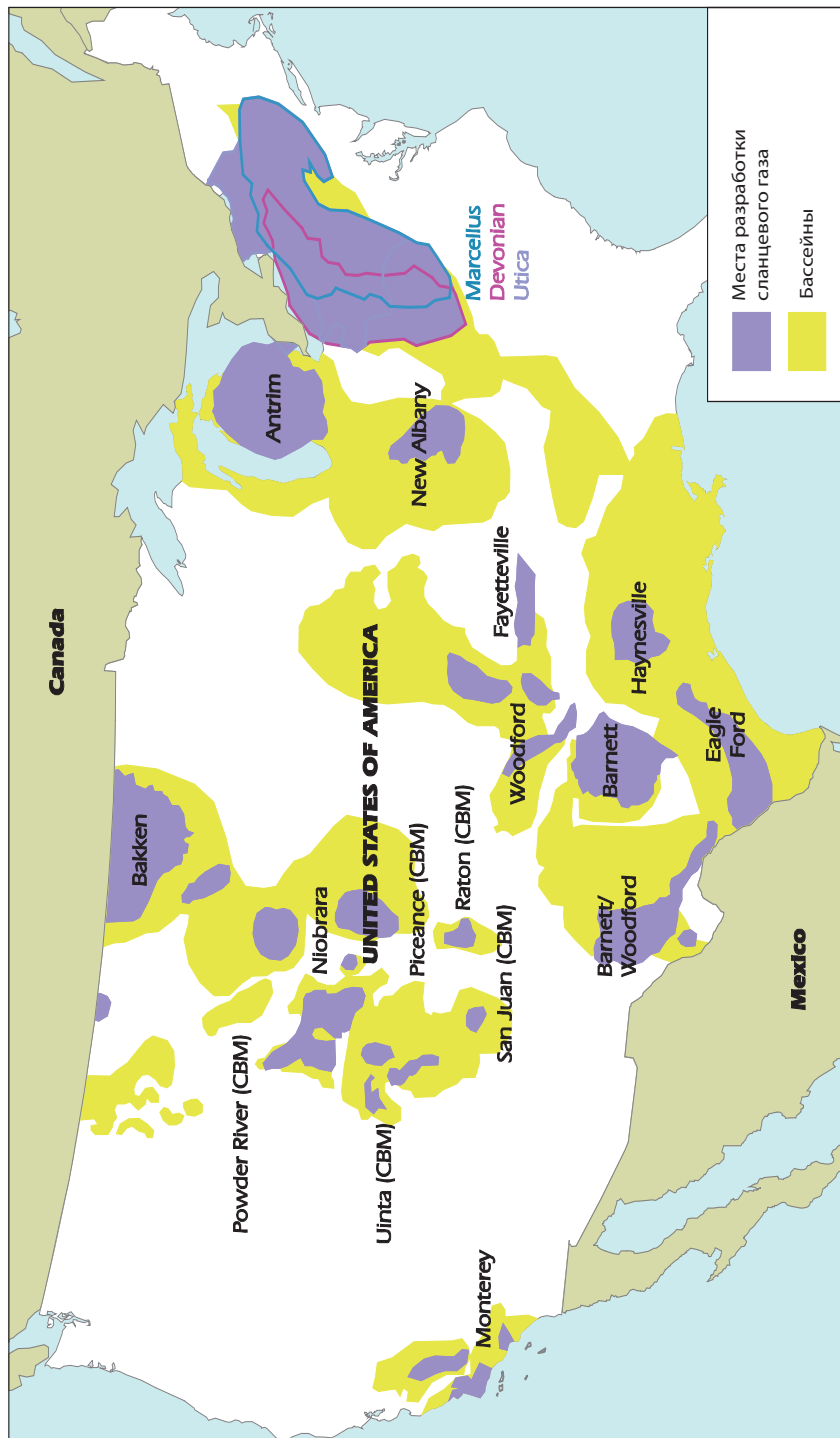


Рисунок 7. Разрабатываемые месторождения сланцевого газа в США



Примечание. CBM – метан угольных пластов (от англ. coalbed methane).

Таблица. **Бюджет Министерства энергетики США на научные цели**

	Бюджет, тыс. долл. США			Сравнение бюджетов 2014 и 2012 гг., %
	2012	2013*	2014*	
Передовые компьютерные научные исследования	428304	443566	465593	+8,7
Базовые науки в области энергетики	1644767	1698424	1862411	+13,2
Исследования в области биологии и охраны окружающей среды	592433	613587	625347	+5,6
Научная программа в области физики ядерного синтеза	392957	403450	458324	+16,6
Физика высоких энергий	770533	795701	776521	+0,8
Ядерная физика	534642	550737	569938	+6,6
Подготовка кадров – преподавателей и ученых	18500	18613	16500	-10,8
Инфраструктура научных лабораторий	111800	112485	97818	-12,5
Безопасность	80573	81066	87000	+8
Дирекция научных программ	185000	186132	193300	+4,5
Инновационные исследования для малого бизнеса	175471	0	0	-100
ВСЕГО	4934980	4903461	5152752	–

Обзор выполнен на основе следующих публикаций:

1. OECD/IEA (2014). Energy Policies of IEA Countries: The United States 2014. IEA Publications. December 2014.

2. Manyika J., Chui M., Bughin J. et al. Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy. McKinsey Global Institute (2013).

3. Ferrar K. J., Michanowicz D. R., Christen Ch. L. et al. Assessment of Effluent Contaminants from Three Facilities Discharging Marcellus Shale Wastewater to Surface Waters in Pennsylvania // Environ. Sci. Technol. 2013. V. 47 (7). P. 3472–3481.

4. Warner N.R., Christie C.A, Jackson R.B. et al. Impacts of Shale Gas Wastewater Disposal on Water Quality in Western Pennsylvania // Environ. Sci. Technol. 2013. V. 47 (20). P. 11849–11857.

5. Gordalla B.C., Ewers U., Frimmel F.H. Hydraulic fracturing: a toxicological threat for groundwater and drinking-water? // Environ. Earth Sci. 2013. V. 70. № 8. P. 3875–3893.

6. Lutz B.D., Lewis A.N., Doyle M.W. Generation, transport, and disposal of wastewater associated with Marcellus Shale gas development // Water Resources Research. 2013. V. 49. № 2. P. 647–656.

Тематические рубрики ежемесячного обзора

Аэронавтика и космос

Биотехнологии и генетика. Сельское хозяйство,
пищевая и химическая промышленность

Информационные и телекоммуникационные технологии
и вычислительная техника

Исследования в области ядерной и квантовой физики

Медицинские технологии и оборудование

Нанотехнологии и новые материалы, микроэлектроника

Социальные и экономические науки и статистика

Энергетика и транспорт