

**Дмитриевский А. Н.**

академик РАН, д-р геол.-мин. наук, г.н.с. ИПНГ РАН, профессор РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, a.dmitrievsky@ipng.ru

**Еремин Н. А.**

д-р техн. наук, г.н.с. ИПНГ РАН, профессор РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, ermn@mail.ru

## ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОЛИГОНЫ И СЛАНЦЕВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

*Создание прорывных нефтегазовых технологий требует государственное участие и финансирование. Одним из элементов создания прорывных технологий в нефтегазовом комплексе являются цифровые государственные технологические полигоны. В статье рассмотрена роль цифровых технологических полигонов прошлого века в создании прорывных технологий, ставших основой сланцевой революции 2010-2020-х годов. Описана структура и динамика развития государственных технологических полигонов Министерства энергетики США. Государственные технологические полигоны входят в состав Национальной лаборатории энергетических технологий Управления ископаемой энергией и выбросами углерода Министерства энергетики США. Национальная лаборатория энергетических технологий одна из 17 Национальных лабораторий Министерства энергетики США. Национальная лабораторная система является краеугольным камнем так называемого «железного треугольника» США – обороны, науки и промышленности, и обеспечивает национальную и энергетическую безопасность. Цифровые прорывные технологии позволяют использовать горючие полезные ископаемые для производства надежной и доступной энергии, необходимой для поддержания роста внутреннего производства, развития производственной инфраструктуры, повышения глобальной конкурентоспособности, занятости и освобождения США от экспорта иностранной нефти и газа. Кратко описана история создания цифровых прорывных технологий (3D сеймика и картирование, горизонтальное бурение, массивированный и многоступенчатый гидравлический разрыв пласта, супер-скважина). Представлена эволюция сланцевой добычи углеводородов.*

**Ключевые слова:** цифровой технологический полигон, сланцевая революция, нефть, газ, прорывная технология, государственный технологический полигон, Министерство энергетики США, Управление ископаемой энергией и выбросами углерода, Национальная лабораторная система, «железный треугольник», оборона, наука, промышленность, национальная безопасность, энергетическая безопасность, эволюция сланцевой добычи, 3D сеймика, 3D картирование, горизонтальное бурение, массивированный гидравлический разрыв пласта, многоступенчатый гидравлический разрыв пласта, супер-скважина.

Нефтегазовые компании стремятся сократить издержки на НИОКР, в том числе применяя цифровые технологические полигоны для отработки инновационных и прорывных технологий в поиске, разведке, бурении, освоении, разработке, эксплуатации, консервации и ликвидации месторождений и подземных хранилищ углеводородов. При этом в качестве инструмента анализа поступающей информации и систем поддержки принятия решений на цифровых технологических полигонах применяются методы искусственного интеллекта [1-9].

Государственные цифровые технологические полигоны в США

Национальная лабораторная система, управляемая Министерством энергетики США, является одной из крупнейших научно-исследовательских систем в мире. Министерство энергетики США обеспечивает до 50% от общего финансирования фундаментальных, поисковых и прикладных наук. Национальная лабораторная система является краеугольным камнем так называемого «железного треугольника» США – обороны, науки и промышленности, и способствует эффективной централизации денежных и интеллектуальных ресурсов в научные исследования в области национальной и энергетической безопасности. В США под национальной безопасностью понимается совокупность оборонных (защитных) и внешнеполитических мероприятий, укрепляющих неуязвимость государства от враждебных актов или других видов внешнего вмешательства, что достигается: военным или оборонным преимуществом над любым иностранным государством или группой государств; благоприятными позициями на международной арене; военным потенциалом, способным успешно противостоять враждебным или разрушительным действиям открыто или тайно, извне или изнутри. [10]. В Российской Федерации под национальной безопасностью понимается состояние защищенности национальных интересов Российской Федерации от внешних и внутренних угроз, при котором обеспечиваются реализация конституционных прав и свобод граждан, достойное качество и уровень их жизни, гражданский мир и согласие в стране, охрана суверенитета Российской Федерации, ее независимости и государственной целостности, социально-экономическое развитие страны. [11].

В США под энергетической безопасностью понимается способность страны обеспечивать достаточные, доступные и стабильные поставки энергии для удовлетворения своих внутренних, промышленных, транспортных и военных потребностей. Президент США Байден в своем «Плане революции чистой энергетики» от 2020 г. так сформулировал свою позицию в области энергетики:

1) ужесточение ограничений на выбросы метана нефтегазовыми предприятиями, разработка новых более строгих стандартов экономии топлива для транспортных средств, защита экосистем федеральных земель и вод, а также запрет новых разрешений на аренду федеральных земель и акваторий для добычи нефти и газа;

2) разработка законодательной базы, где будет задан курс на достижение цели по выходу США на нулевой уровень выбросов парниковых газов к 2050 году;

3) возвращение США в Парижское соглашение по климату и продвижение инициативы и призывов формирования более амбициозных национальных рамок соглашения с другими странами;

4) инвестирование в течение 10 лет 400 млрд долл. государственных средств в «чистую энергетику» и связанные с ней инновации;

5) ускорение внедрения «чистых» технологий в экономике за счет создания стимулов для глубокой модернизации производств, сочетающей электрификацию, энергоэффективность и производство «чистой» энергии;

6) приоритизация «экологической справедливости» для всех федеральных агентств;

7) ужесточение ответственности за загрязнение окружающей среды;

8) создание 10 миллионов хорошо оплачиваемых рабочих мест для представителей среднего класса, занятых в реализации плана;

9) выполнение социальных обязательств перед работниками, занятыми в секторе добычи ископаемых топлив. [12]

В России под энергетической безопасностью понимается состояние защищенности экономики и населения страны от угроз национальной безопасности в сфере энергетики, при котором обеспечивается выполнение предусмотренных законодательством Российской Федерации требований к топливо – и энергоснабжению потребителей, а также выполнение экспортных контрактов и международных обязательств Российской Федерации. [13].

В настоящее время на территории США действуют 17 Национальных лабораторий (см. **рис.1**). Офисы научных лабораторий (на рисунке они обозначены зеленым цветом): 1 – Эймсская лаборатория (Ames Laboratory, 1947); 2 – Аргоннская национальная лаборатория (Argonne National Laboratory, 1946); 3 – Брукхейвенская национальная лаборатория (Brookhaven National Laboratory, 1947); 4 – Национальная ускорительная лаборатория им. Энрико Ферми (Фермилаб) (Fermi National Accelerator Laboratory, 1967); 5 – Национальная лаборатория имени Лоуренса в Беркли (Lawrence Berkeley National Laboratory, 1931); 6 – Окриджская национальная лаборатория (Oak Ridge

National Laboratory, 1943); 7 – Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория (Pacific Northwest National Laboratory, 1965); 8 – Лаборатория физики плазмы Принстонского университета (Princeton Plasma Physics Laboratory; 1951); 9 – Национальная ускорительная лаборатория SLAC (SLAC National Accelerator Laboratory, 1962) и 10 - Лаборатория Джефферсона (Thomas Jefferson National Accelerator Facility, 1984).

Лаборатории Министерства энергетики США (на рисунке они обозначены желтым цветом): 1 – Национальная лаборатория Айдахо (Idaho National Laboratory; 1949); 2 – Национальная лаборатория энергетических технологий (National Energy Technology Laboratory; 1999); 3 – Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии (National Renewable Energy Laboratory, 1977) и 4 – Саванна-Риверская национальная лаборатория (Savannah River National Laboratory; 1952).

Лаборатории Национального управления по ядерной безопасности США (NNSA) (на рисунке они обозначены синим цветом): 1 – Ливерморская национальная лаборатория (Lawrence Livermore National Laboratory, 1952); 2 – Лос-Аламосская национальная лаборатория (Los Alamos National Laboratory, 1943) и 3 – Сандийские национальные лаборатории (Sandia National Laboratories, 1948, 1956).

Национальная лаборатория энергетических технологий – НЛЭТ (the National Energy Technology Laboratory – NETL ) является ведущим центром программы полигонных исследований инновационных разработок Управления ископаемой энергией и выбросами углерода Министерства энергетики США (см. **рис. 2**). Миссия Национальной лаборатории энергетических технологий сосредоточена на открытии, разработке и внедрении технологических решений для укрепления энергетической безопасности и защиты окружающей среды для будущих поколений. Прорывные технологии позволяют использовать горючие полезные ископаемые топливо для производства надежной и доступной энергии, необходимой для поддержки роста внутреннего производства, улучшения инфраструктуры, повышения глобальной конкурентоспособности, повышения занятости и освобождения США от зависимости от иностранной нефти и газа. Национальная лаборатория энергетических технологий (НЛЭТ) является государственной лабораторией Министерства энергетики США, т.е. она принадлежит государству и управляется правительством (GOGO – Government – Owned, Government – Operated). Национальная лаборатория энергетических технологий обладает компетенциями, возможностями и полномочиями для руководства важнейшими стратегическими императивами и

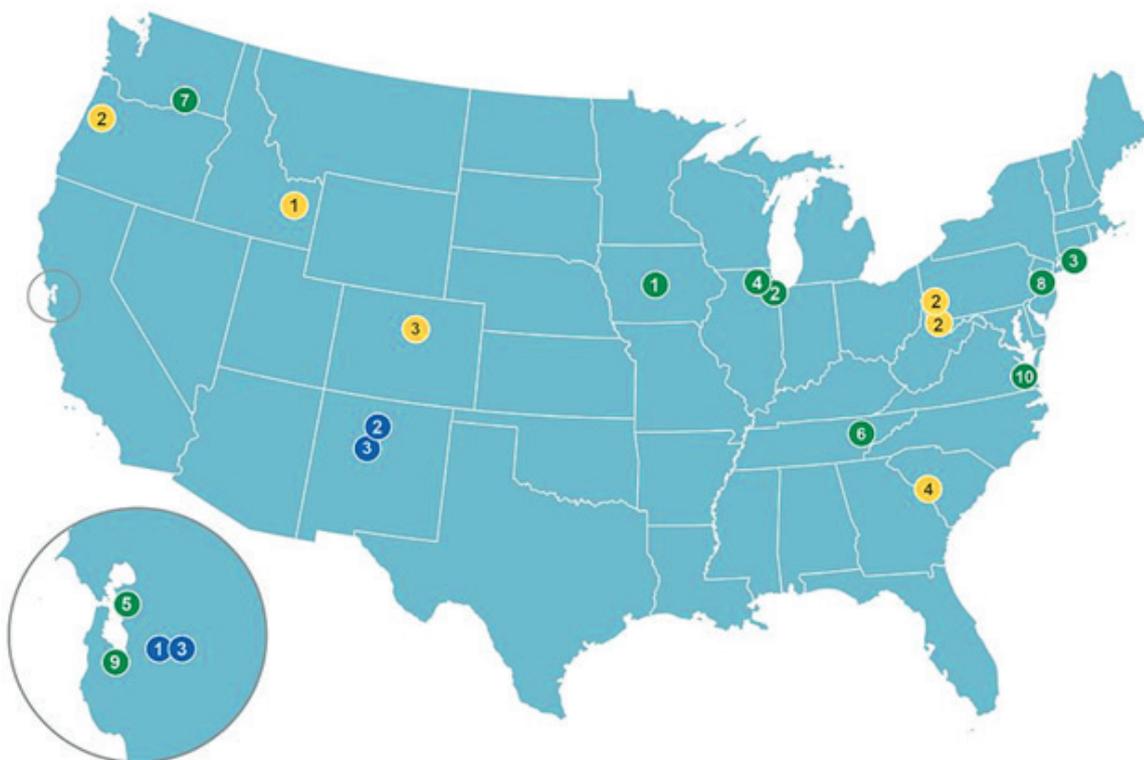


Рис. 1.

Местоположение 17 Национальных лабораторий Министерства энергетики США по состоянию на 01.01.2022 г.

инициативами, которые будут способствовать продвижению энергетических, экономических и производственных приоритетов Америки. Ученые в его центрах в Питтсбурге, штат Пенсильвания, и Моргантауне, штат Западная Вирджиния, проводят исследования на государственных технологических полигонах, в то время как администраторы контрактов наблюдают за почти 700 финансируемыми из федерального бюджета проектами, проводимыми партнерами по исследованиям из частного сектора. Офис в Хьюстоне, штат Техас, является частью Стратегического центра Национальной лаборатории энергетических технологий по природному газу и нефти. Арктический энергетический офис НЛЭТ в Анкоридже, Аляска, содействует арктическим энергетическим исследованиям, связанным с ископаемыми энергоресурсами и дистанционным производством электроэнергии, для удовлетворения уникальных энергетических потребностей штата Аляска. Исследователи из НЛЭТ в Олбани, штат Орегон, являются специалистами в области передовых материалов с особым опытом в области износа и коррозии, плавки и литья, а также разработки материалов. Офис управления стратегическими нефтяными резервами расположен за пределами Нового Орлеана, штат Луизиана, и наблюдает

за повседневной работой основных хранилищ сырой нефти и логистических объектов для национального стратегического запаса нефти.

Неоценим вклад в сланцевую революцию ученых Института нефти АН СССР Христиановича С.А. и Желтова Ю.П., которые первыми в мире разработали научные основы гидравлического разрыва пласта. [20]

Сланцевая революция 2010-2020-х годов является результатом технологических прорывов, происходивших более трех десятилетий, на технологических полигонах США. Ранние исследования и разработки Министерства энергетики США в области трудноизвлекаемых газовых песков, газовых сланцев и метана угольных пластов помогли ускорить развитие технологий сланцевой революции 2010-2020-х годов.

Горизонтальное бурение и гидроразрыв пласта сделали добычу сланцевого газа экономически рентабельной и альтернативой традиционному природному газу. На **рис. 3** схематически показана геологическая природа большинства основных источников природного газа: традиционные газовые месторождения и газонефтяные месторождения с газовой шапкой; и нетрадиционные: сланцевый газ, газ из плотных пород и газ угленосных отложений.



Рис. 2.

Местоположение государственных центров и технологических полигонов Национальной лаборатории энергетических технологий Управления ископаемой энергией и выбросами углерода Министерства энергетики США, где : 1 – Олбани, штат Орегон (Albany, OR); 2 – Питтсбург, штат Пенсильвания (Pittsburgh, Pa.); 3 – Моргантаун, штат Вирджиния (Morgantown, W. Va.); 4 – штаб – квартира Министерства энергетики США (DOE USA); 5 – офис управления проектом стратегических запасов нефти, Новый Орлеан, штат Луизиана (New Orleans, La.); 6 – Шугарленд, штат Техас (Sugarland, TX) и 7 – Анкоридж, штат Аляска (Anchorage, AK).

Извлекаемые ресурсы природного газа в мире, трлн. куб. м: всего – 790, традиционного – 460, нетрадиционного – 330 (из них сланцевый газ – 200; газ из плотных пород – 80, газ угленосных отложений – 50). [14]

**Хронология сланцевой революции**

1821 г. – Впервые природный газ был добыт из сланцевых отложений во Фредонии, штат Нью-Йорк (Fredonia, NY).

1947 г. – Гидравлический разрыв пласта впервые был использован для извлечения природного газа из известняковых отложений.

1948 г. – Кларк Ж. впервые описал технологию проведения скважинной операции ГРП.

1955 г. – Создание учеными Института нефти АН СССР Христиановичем С.А. и Желтовым Ю.П. научных основ гидравлического разрыва пласта, а именно, теорию образования и распространения двумерных трещин в пласте.

1955 г. – Скважинные операции с ГРП в США достигли своего пика – 54 тысячи в год.

1958 г. - Количество скважинных операций с ГРП в СССР превысило 1,5 тысяч в год.

1976 г. – Центр энергетических исследований Моргантауна (MERC), лаборатория при Горном бюро США (The Morgantown Energy Research Center – MERC) – которое позже было переименовано в Национальную лабораторию энергетических технологий (НЛЭТ), инициировал проект по разработке Восточных газовых сланцевых отложений (The Eastern Gas Shales Project). В рамках

проекта были нанесены на карту и протестированы образцы керна из нетрадиционных газовых месторождений. MERC заключила контракты с десятками университетов и частных компаний, чтобы продемонстрировать извлечение газа из сланцевых пластов и других нетрадиционных запасов газа. Национальные лаборатории (Лос-Аламос, Лоуренс Ливермор, Сандия и другие) приняли активное участие в данном проекте.

1976 г. – два инженера MERC - Джозеф Пасини III, Уильям К. Оверби-младший (Joseph Pasini III & William K. Overby, Jr.) запатентовали инновационную технологию направленного бурения, которая позволила значительно увеличить коэффициент охвата пласта дренированием. [15]

1976-2000 гг. были созданы следующие прорывные технологии горизонтальное бурение, скважинные двигатели и микросейсмическое трехмерное картирование в рамках проектов Министерства энергетики США. [16]

1977 г. – создание прорывной технологии массивированного гидравлического разрыва пласта (MHF) на полигоне Министерства энергетики США в Колорадо. [17]

1978 г. – Результатом партнерства между General Electric и Управлением по исследованиям и разработкам в области энергетики (ERDA, предшественником DOE) стала разработка усовершенствованных буровых алмазных долот при бурении сланцевых отложений в сотрудничестве с газовыми частными компаниями.

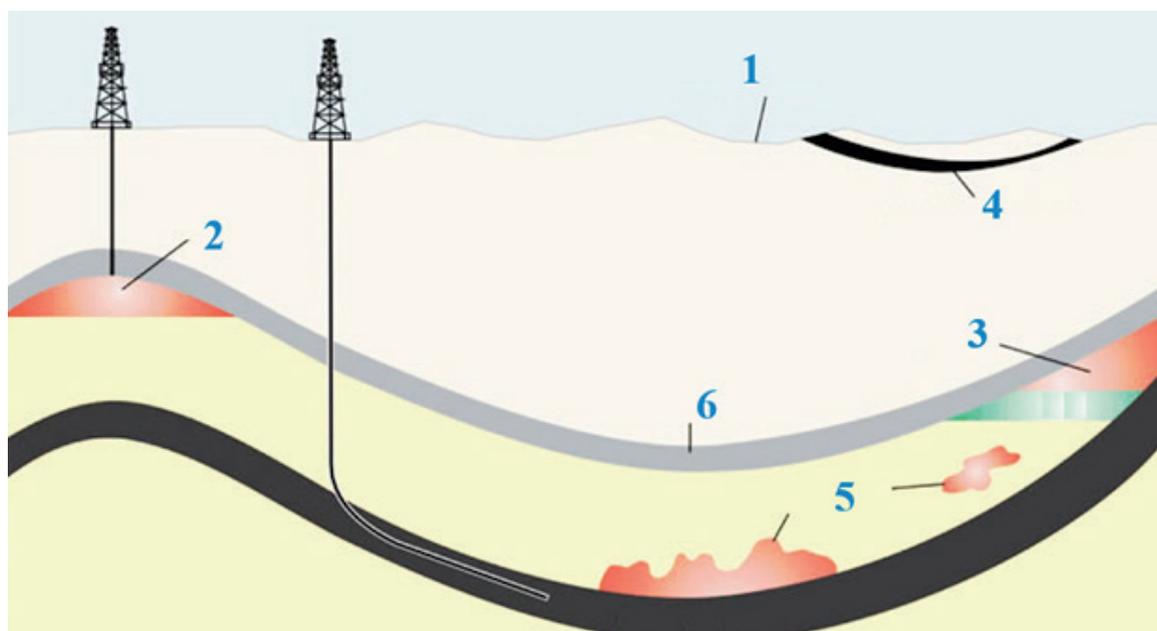


Рис. 3.

Схема геологической природы большинства основных источников природного газа, где 1 – земная поверхность; 2 – традиционный газ из газового месторождения; 3 – традиционный газ из нефтегазового месторождения с газовой шапкой; 4 – нетрадиционный газ из угленосных отложений; 5 – нетрадиционный газ из плотных пород; 6 – покрышка. Источник: EIA.

1979 г. – Министерство энергетики США одобрило План коммерциализации добычи природного газа из нетрадиционных источников.

1980 г. – В 1980 году Конгресс принял Закон о налоге на непредвиденную прибыль, который, среди прочего, разрешал льготный налоговый кредит на добычу по разделу 29 для нетрадиционного газа, предоставляя стимулирование в размере \$17.65 за тысячу куб. м. (или 0,50 доллара США за тысячу кубических футов) природного газа, добытого из нетрадиционных ресурсов (действовал до 2002 года).

1986 г. – Создание прорывной технологии трехмерной микросейсмической визуализации и картирования высокопродуктивных зон газовых залежей Государственными Сандийскими национальными лабораториями (Sandia National Laboratories) для применения в бурении отложений сланцевого газа. Новые инструменты для сейсморазведки и картографическое программное обеспечение позволили бурильщикам визуализировать сланцевые образования и определить местонахождение естественных трещин и неравномерно распределенных высокопродуктивных зон газовых залежей (sweet spots).

1986 г. – Первая успешная горизонтальная скважина с массивным гидравлическим разрывом пласта в девонских сланцевых от-

ложениях была завершена строительством совместным предприятием Министерства энергетики и частного предприятия в округе Уэйн, Западная Вирджиния (Wayne County, West Virginia).

1991 г. – Техасская газовая компания Mitchell Energy во главе с Джорджем П. Митчеллом совместно с Институтом газовых исследований (GRI) на инвестиции Министерства энергетики США закончили строительством первую успешную горизонтальную скважину, и разработали инструментальную микросейсмическую визуализацию GRI сложной геологии плотных сланцевых пластов Барнетта Шейл (Barnett Shale).

1995 г. – ПАО «Газпром» провел успешное испытание ГПП на опытном полигоне Карамовского месторождения (Ноябрьскнефтегаз).

1997 г. – Компания Mitchell Energy разработала инновационный метод гидроразрыва пласта, называемого гидроразрывом со скользкой водой (slick water fracking), который сделал рентабельной добычу сланцевого газа. [18, 19]

1998 г. – Инженеры Mitchell Energy впервые добились рентабельности промышленной добычи сланцевого газа на месторождении Барнет Шейл с применением ГПП.

2002 г. – Завершение периода льготного налогообложения по разделу 29 для добычи нетрадиционного газа.

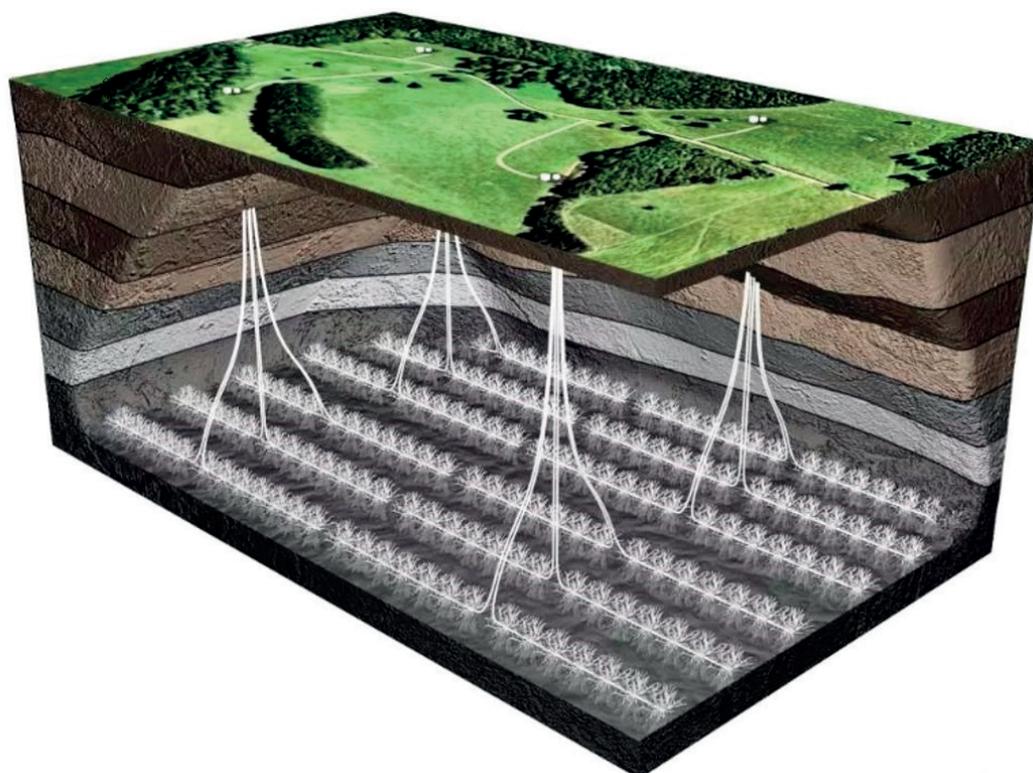


Рис. 4.

Суперскважина на участке сланцевого месторождения площадью 2,6 км<sup>2</sup>.

2012-2022 г. – Россия занимает второе место по количеству скважинных операций с ГРП, в том числе в горизонтальных скважинах.

Все ключевые технологии сланцевой революции, а именно, горизонтальное бурение, массивный гидравлический разрыв пласта, 3D сейсмика и суперскважина (см. **рис.4**) были разработаны учеными НЛЭТ Министерства энергетики США, которые работали с частными компаниями.

Джордж Фиdias Митчелл (англ. George Phydias Mitchell; 21 мая 1919 – 26 июля 2013) – «отец сланцевой революции», американский миллиардер, основатель нефтегазового гиганта «Mitchell Energy & Development», один из пионеров внедрения методов ГРП для добычи сланцевого газа. Сын эмигранта из Греции Саваса Параскевопулоса (который в США сменил свое имя на Майк Митчелл). Джордж Митчелл в 1940 году по окончании Техасского университета A&M стал геологом. Митчелл основал независимую нефтегазодобывающую компанию «Mitchell Energy & Development». В 1986 г. его компания «Mitchell Energy & Development» при государственном финансировании и поддержке создала промышленную технологию ГРП в горизонтальных скважинах для добычи сланцевого газа. В 2001 году Митчелл продал свою компанию за 3,5 миллиарда долларов корпорации «Devon Energy», в которой его старший сын Тодд

Митчелл состоял членом совета директоров. В 2011 г. он передал половину своего состояния на благотворительные нужды: науку и решение экологических проблем, связанных с разработкой месторождений сланцевого газа.

Будущий рост сланцевой добычи в США связан с неизбежным увеличением добычи воды, поскольку для операций гидроразрыва пласта требуются большие объемы воды. Как следует из отчетов Ассоциации по защите окружающей среды (US Environmental Protection Agency – EPA) дополнительная годовая добыча нефти на одну скважинную операцию ГРП составляет 10,0 тысяч м<sup>3</sup>, при этом использование воды достигает 11,5 тысяч м<sup>3</sup>. [<https://www.epa.gov/hfstudy/>]. Повышенные цены на нефть стимулируют добычу сланцевой нефти в основных бассейнах. По данным компаний Rystad Energy и FracFocus уровни отбора попутной воды на нефтяных месторождениях на суше в США должны вернуться к рекордно высокому уровню в 2,64 миллиарда м<sup>3</sup> (22,9 миллиарда баррелей) в 2022 году, что на 8% больше, чем в 2021 году. Ожидается, что к 2023 году уровни отбора попутной воды достигнут 2,64 миллиарда м<sup>3</sup> (23 миллиардов баррелей), а в 2026 году – до 2,75 миллиарда м<sup>3</sup> (23,8 миллиарда баррелей). В 2022 году активность скважинных операций гидроразрыва пласта вырастет на 7%. На **рис. 5** показано местоположение в США скважин с операциями ГРП после 2000 г.

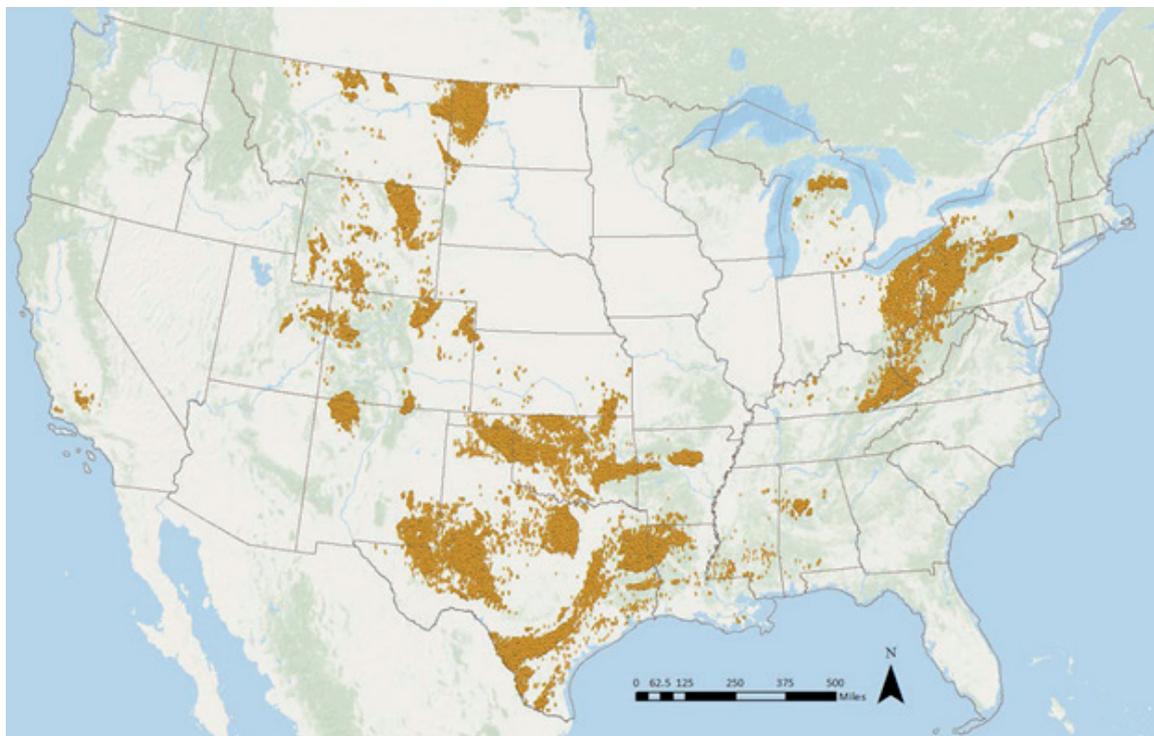


Рис. 5.

Местоположение в США скважин с операциями ГРП после 2000 г. Источник: *Drillinginfo, Inc.*

Ключевые направления исследований НЛЭТ в 2022 г.: прикладное материаловедение и технологии; химические технологии; наука и анализ принятия решений; экологическая наука о недрах; системное проектирование и интеграция.

Уникальные научные установки:

Инженерная лаборатория на основе имитационного моделирования (Simulation-Based Engineering Laboratory)

Центр технологий преобразования энергии (Energy Conversion Technology Center)

Передовое оборудование по разработке сплавов (Advanced Alloy Development Facility)

Устройство для определения характеристик материалов и минералов (Materials and Minerals Characterization Facility)

Геологический научно-технический комплекс (Geological Science and Engineering Facility)

Мобильная лаборатория экологического мониторинга (Mobile Environmental Monitoring Laboratory)

Центр по обмену открытыми энергетическими данными (Energy Data Exchange)

Лаборатория вычислительной инженерии (Computational Engineering Laboratory)

Активные проекты на технологических полигонах НЛЭТ по состоянию на 01.01.2022 г.:

1. Взаимосвязь энергии и воды и возможности водородной экономики (Energy-Water Nexus Implications and Opportunities of a Hydrogen Economy) сосредоточены на оценке потребления и производства воды в текущих и будущих сценариях водородной экономики для разра-

ботки базового понимания, на основе которого Министерство энергетики и заинтересованные стороны могут принимать инвестиционные решения, учитывающие последствия использования энергии и воды.

2. Подходы с использованием электромагнитной энергии (микроволновые, радиочастотные, плазменные и др.) для недорогого производства водорода из горючих ископаемых видов топлива (Electromagnetic Energy-Assisted Approaches to Convert Fossil Fuels to Low-Cost Hydrogen).

3. Совместная оптимизация интегрированных процессов и материалов для производства «голубого» водорода (Process and Materials Co-optimization for Production of Blue Hydrogen).

4. Цепочка поставок высокотемпературных материалов (High-Temperature Materials Supply Chain) для сверхкритических энергетических углекислотных циклов (sCO<sub>2</sub> power cycles или supercritical CO<sub>2</sub> power cycles).

5. Беспроводные технологии 5G (5G Wireless Technologies) поддерживают проекты исследований и разработок, которые помогают ответить на вопросы о влиянии беспроводной технологии пятого поколения на производство горючих полезных ископаемых.

6. Квантовые энергетические системы и технологии (Energy-Water Nexus Implications and Opportunities of a Hydrogen Economy) использует квантовые информационные науки по ускоренному проектированию материалов для суровых арктических условий, повышенной кибербезо-

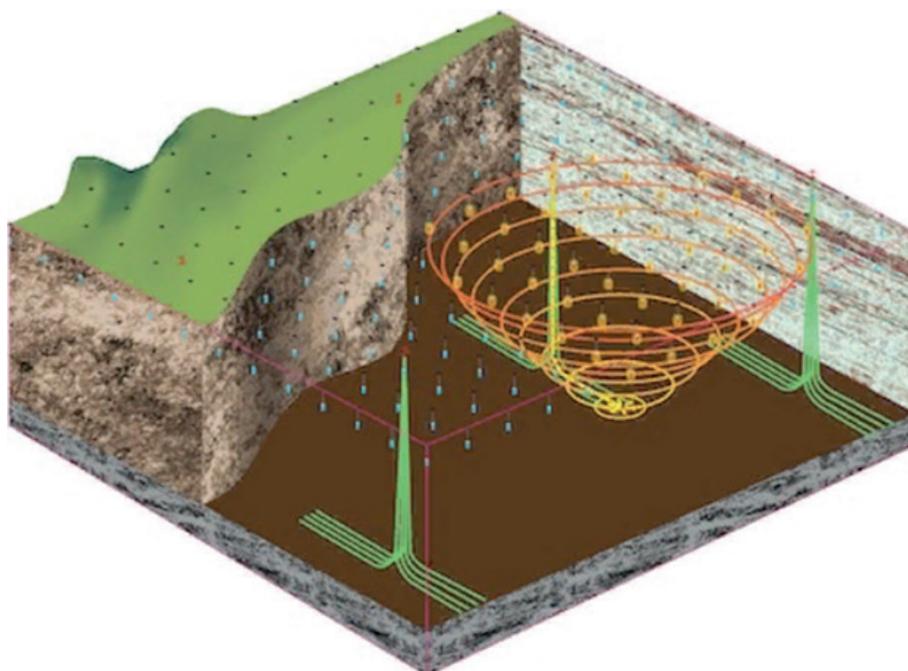


Рис. 6.

Распределенные сенсорные сети на нефтегазовом месторождении с суперскважинами.

пасности инфраструктуры горючих полезных ископаемых с помощью методов квантовой связи и новых методов обнаружения, которые обеспечивают более низкие уровни обнаружения критических параметров.

7. Инновационные сенсоры и контрольное оборудование (Novel Sensors and Controls for Flexible Generation) для гибкого управления процессами выработки электроэнергии из угля.

8. Машинное обучение для вычислительной гидродинамики (Machine Learning for Computational Fluid Dynamics) предназначено для создания общей модели сопротивления в скоплениях несферических частиц в широком диапазоне чисел Рейнольдса и Стокса; твердых объемных фракций; плотности частиц, их ориентации и соотношения сторон.

9. Кибербезопасные сенсоры (Cybersecure Sensors) на основе использования инновационных технологий (блокчейн, децентрализованные одноранговые интернет-протоколы, межмашинное взаимодействие – M2M и промышленный Интернет вещей – IIoT) для защиты данных обработки сигналов и других информационных потоков в распределенных сенсорных сетях производственных систем (см. *рис. 6*).

10. Моделирование производственных систем с использованием высокопроизводительных вычислительных систем.

11. Автоматизированная проверка, анализ и ремонт компонентов предприятия с помощью робототехники на основе интеграции нескольких технологий (например, автоматизация, неразрушающий контроль, робототехника, ремонт).

12. Инспекция с помощью робототехники

13. Ремонт с помощью робототехники

14. Автоматизация сбора и анализа данных управления

15. Моделирование в реальном времени киберфизических систем направлено на усовершенствование численных методов для моделирования в реальном времени энергетическими компонентами киберфизических систем.

16. Анализ жизненного цикла (Life cycle analysis) производства – это метод принятия эффективных экологических чистых решений путем учета всех воздействий от добычи сырья (нефти,

газа и др.) до продуктов их переработки, и управлением в режиме реального времени на всем протяжении жизненного цикла производства.

Где под горючими ископаемыми видами топлива (Fossil Fuels) понимается нефть, каменный уголь, горючий сланец, природный газ и его гидраты, торф и другие горючие минералы, и вещества из группы каустобиолитов, применяемые в основном как топливо. Сверхкритические энергетические углекислотные циклы ( $sCO_2$  power cycles) представляют собой полузаткнутые циклы газотурбинной установки, в которых в качестве рабочей среды используется сверхкритический  $CO_2$  (при температуре свыше  $31,1^\circ C$  и давлении свыше  $7,4$  МПа). В этом случае, для преобразования заданного количества подводимой теплоты в электричество требуется меньше работы и снижаются затраты на газ. Сверхкритический  $CO_2$  имеет плотность, подобную жидкому  $CO_2$ , а вязкость – газообразному  $CO_2$ .

#### **Благодарности**

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания (тема «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности (фундаментальные, поисковые и прикладные исследования)», № АА-ААА19-119013190038-2).

#### **Заключение**

Сланцевая революция 2010-2020-х годов – это промышленное внедрение инновационных технологий добычи углеводородов из сланцевых отложений: горизонтального бурения, многостадийного гидравлического разрыва пласта, 3D сейсмика, созданных за счет государственного 30 летнего финансирования и поддержки исследовательских работ, и испытанных на государственных цифровых технологических полигонах Управления ископаемой энергией и выбросами углерода Министерства энергетики США. Масштабированный гидроразрыв пласта, горизонтальные скважины, трехмерное картирование, сейсмическая визуализация, тестирование технологий на полигонах, пилотные проекты – это ключевые технологии сланцевой революции. Министерство энергетики США сыграло решающую роль в ускоренной разработке и коммерциализации вышеперечисленных инновационных технологий. **XXI**

## Литература

1. Дмитриевский А.Н., Еремин Н.А. Цифровые полигоны НГК РФ // Доклад на Форсайт-сессии и Круглом столе: «Промышленные полигоны, технологические кластеры и инжиниринговые центры: основные этапы трансфера технологий и проблемы финансирования», в рамках заседания рабочей группы «Разведка, добыча, сервис» Экспертного совета по технологическому развитию нефтегазовой отрасли при Минэнерго России на Национальном нефтегазовом форуме, 16-17 апреля 2019 г, ЦБК «Экспоцентр», Москва
2. Отчёт о научно-исследовательской работе за 2021 г. по теме: «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности (фундаментальные, поисковые и прикладные исследования)» (промежуточный). Внутренний номер в ИС «Парус» - 0139-2019-0009.
3. Черников А.Д., Еремин Н.А., Столяров В.Е., Сбоев А.Г., Семенова-Чашчина О.К., Фицнер Л.К. (2020). Применение методов искусственного интеллекта для выявления и прогнозирования осложнений при строительстве нефтяных и газовых скважин: проблемы и основные направления решения. *Георесурсы*, 22(3), с. 87–96. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.87-96> ISSN 1608-5043 eISSN 1608-5078 Chernikov A.D., Eremin N.A., Stolyarov V.E., Sboev A.G., Semenova-Chashchina O.K., Fitsner L.K. (2020). Application of artificial intelligence methods for identifying and predicting complications in the construction of oil and gas wells: problems and solutions. *Georesursy = Georesources*, 22(3), pp. 87-96. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.87-96>
4. А.Н. Дмитриевский, А.Г. Сбоев, Н.А. Еремин, А.Д. Черников, А.В. Наумов, А.В. Грязнов, И.А. Молошников, С.О. Бороздин, Е.А. Сафарова Предупреждение осложнений и аварий в процессе бурения нефтегазовых скважин с использованием методов машинного обучения // *Георесурсы*, №4, с. 79-85. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.79-85> A.N. Dmitrievsky, A.G. Sboev, N.A. Eremin, A.D. Chernikov, A.V. Naumov, A.V. Gryaznov, I.A. Moloshnikov, S.O. Borozdin, E.A. Safarova Prevention of complications and accidents in the process of drilling oil and gas wells using machine learning methods *Georesursy = Georesources*, issue 4, pp. 79-85. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.79-85>
5. Архипов А.И., Дмитриевский А.Н., Еремин Н.А., Черников А.Д., Бороздин С.О., Сафарова Е.А., Сейнароев М.Р. Анализ качества данных станции геолого-технологических исследований при распознавании поглощений и газонефтеводопроявлений для повышения точности прогнозирования нейросетевых алгоритмов. // *Нефтяное хозяйство*. 2020, №08 (1162), с.63-67. А.И. Arkhipov, A.N. Dmitrievsky, N.A. Eremin, A.D. Chernikov, S.O. Borozdin, E.A. Safarova, M.R. Seinaroev Data quality analysis of the station of geological and technological researches in recognizing losses and kicks to improve the prediction accuracy of neural network algorithms // *Neftyanoe Khozyaystvo*. Issue 1162. 2020, №08 (1162), p. 63-67. ISSN: 0028-2448 eISSN: 0028-2448 (In Russian). DOI: 10.24887/0028-2448-2020-8-63-67
6. Borozdin, S., Dmitrievsky, A., Eremin, N., Arkhipov, A., Sboev, A., Chashchina-Semenova, O., Fitzner L., Safarova, E. Drilling Problems Forecast System Based on Neural Network. // *SPE Annual Caspian Technical Conference* (2020). doi:10.2118/202546-MS
7. Дмитриевский Анатолий Николаевич, Еремин Николай Александрович, Черников Александр Дмитриевич, Чашчина-Семенова Ольга Кимовна, Фицнер Леонид Константинович Автоматизированная система выявления и прогнозирования осложнений в процессе строительства нефтяных и газовых скважин // Патент на изобретение RU 2 745 137 C1, 22.03.2021. Заявка № 2020129673 от 08.09.2020. Automated system for identifying and predicting complications during the construction of oil and gas wells.
8. Дмитриевский Анатолий Николаевич, Еремин Николай Александрович, Черников Александр Дмитриевич, Чашчина-Семенова Ольга Кимовна, Фицнер Леонид Константинович Автоматизированная система выявления и прогнозирования осложнений в процессе строительства нефтяных и газовых скважин // Патент на изобретение RU 2 745 136 C1, 22.03.2021. Заявка № 2020129671 от 08.09.2020. Automated system for identifying and predicting complications during the construction of oil and gas wells.
9. Применение методов искусственного интеллекта в задачах предотвращения аварийных ситуаций при строительстве скважин / А. Н. Дмитриевский, Н. А. Еремин, А. И. Архипов [и др.] // *Недропользование XXI век*. – 2021. – № 5-6(92). – С. 6-15.
10. Стратегии национальной безопасности США / Сост. Д.В. Кузнецов. – Б.м.: Б. изд., 2018. – 680 с.
11. Указ Президента РФ от 2 июля 2021 г. № 400 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации».
12. 9 Key Elements of Joe Biden's Plan for a Clean Energy Revolution - URL: <https://joebiden.com/9-key-elements-of-joe-bidens-plan-for-a-clean-energy-revolution/>
13. Указ Президента РФ от 13 мая 2019 г. № 216 «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации»/
14. Hans-Holger Rogner «An Assessment of World Hydrocarbon Resources», 1997 г/
15. «A Century of Innovation». National Energy Technology Laboratory, October 2010.
16. «Energy Research at DOE: Was It Worth It? Energy Efficiency and Fossil Energy Research 1978 to 2000». Committee on Benefits of DOE R&D on Energy Efficiency and Fossil Energy, Board of Energy and Environmental Systems, Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council. 2001.
17. United States Energy Information Administration (EIA). «Annual Energy Outlook 2011».
18. Steinsberger, Nick. Former geologist for Mitchell Energy. Interview by Alex Trembath on December 13, 2011.
19. Steward, Dan. Former geologist for Mitchell Energy. Interview by Michael Shellenberger on November 30, 2011.
20. Образование вертикальных трещин при помощи очень вязкой жидкости / С. А. Христианович, Ю. П. Желтов. - Москва: Акад. наук СССР, 1955. - 33 с.: ил.; 22 см. - (Доклады на IV Международном нефтяном конгрессе в Риме).

**A.N. Dmitrievsky**, *Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, the Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Sciences, Professor of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas, a.dmitrievsky@ipng.ru*  
**N.A. Eremin**, *Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Deputy Director of the Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Sciences, Professor of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas, erm@mail.ru*

## DIGITAL TECHNOLOGICAL TESTING SITES AND THE SHALE REVOLUTION

**Abstract.** The article discusses the role of digital technological testing grounds of the last century in the creation of breakthrough technologies that became the basis of the shale revolution of the 2010-2020s. The structure and dynamics of the development of state technological test sites of the US Department of Energy are described. The state technology sites are part of the National Energy Technology Laboratory of the Fossil Energy and Carbon Emissions Administration of the US Department of Energy. The National Energy Technology Laboratory is one of 17 US Department of Energy National Laboratories. The National Laboratory System is the cornerstone of the so-called «iron triangle» of the United States - defense, science and industry. Digital breakthrough technologies are enabling the use of fossil fuels to generate reliable and affordable energy needed to support domestic production growth, develop industrial infrastructure, increase global competitiveness, employment, and free the United States from foreign oil and gas exports. The history of the creation of digital breakthrough technologies (3D seismic and mapping, horizontal drilling, massive and multi-stage hydraulic fracturing, super-well) is briefly described. The evolution of shale hydrocarbon production is presented.

**Key words:** digital technology testing site, shale revolution, oil, gas, breakthrough technology, state technological testing site, US Department of Energy, Management of fossil energy and carbon emissions, National Laboratory System, Iron Triangle, defense, science, industry, national security, energy security, evolution of shale hydrocarbon production, 3D seismic, 3D mapping, horizontal drilling, massive hydraulic fracturing, multi-stage hydraulic fracturing, super-well.