

ВЫЗВАННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ: СЕРЬЕЗНАЯ УГРОЗА ДОБЫЧЕ СЛАНЦЕВОЙ НЕФТИ?

М.В. Родкин^{1,2}, Т.А. Рукавишникова²

1 – Институт проблем нефти и газа РАН,

2 – Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

e-mail: rodkin@mitp.ru

Введение

Сначала предыстория. Закономерности, определяющие распределение ресурсов углеводородов по планете, по сути, неизвестны, но известно, что это распределение – крайне неравномерное. Основные запасы сконцентрированы в арабских странах и еще в нескольких регионах (Россия, Венесуэла и др.). В то же время потребности современного общества в энергоресурсах безотлагательны и огромны. За счет этого страны – производители нефти, осуществляя картельный сговор, в течение нескольких десятков лет имели возможность удерживать цену нефти на уровне, многократно превышающем ее себестоимость. Нефть не была обычным товаром, цена на который регулируется балансом спроса и основанного на себестоимости предложения. Так, опасаясь «скорого» исчерпания запасов нефти, США искусственно сдерживали добычу собственной нефти, предпочитая покупать ее на мировом рынке.

Ситуация резко изменилась с развитием технологий добычи так называемой сланцевой нефти. Сланцевой нефтью называется легкая нефть, содержащаяся в плохопроницаемых коллекторах, добыча из которых с помощью традиционных методов невозможна. Запасы такой нефти намного превышают запасы обычной нефти. Реализация коммерческих проектов в области добычи сланцевой нефти стала возможной только в условиях высоких мировых цен на нефть. Только в этих условиях могли быть созданы новые технологии нефтедобычи, например метод гидроразрыва пласта, изначально предложенный в СССР. Если бы мировые цены на нефть не столь разительно отличались от себестоимости ее добычи в странах – производителях нефти, технологии разрыва пласта так и остались бы дорогостоящими и практически бесполезными, «теоретически возможными» технологиями.

В настоящее время в мире ежедневно добывается около 100 млн баррелей нефти. Около 10% этого количества приходится на долю США (<https://knoema.ru/vyrone/cost-of-oil-production-by-country>). Быстрее всего растет добыча сланцевой нефти в США. По сообщениям СМИ, осенью этого года по объемам суточной добычи нефти США обогнали

сначала Саудовскую Аравию, затем Россию. Из добываемой в США нефти более половины составляет сланцевая нефть, добыча которой растет особенно быстро (в 2018 г. рост добычи составил около 20%). Текущая себестоимость сланцевой нефти в разы превосходит себестоимость нефти стран Персидского залива и заметно выше средней себестоимости нефти в России. Но себестоимость сланцевой нефти резко различна на разных скважинах (от 40 до 60 \$/баррель) и имеет тенденцию к уменьшению (<http://www.yktimes.ru/новости/slantsevaya-otrasl-ssha-vyihodit-na-samoobespechenie/>).

Поскольку добыча сланцевой нефти осуществляется с помощью методов активного воздействия на пласт, технология допускает возможность быстрых прекращений и восстановлений добычи, что позволяет подстраивать уровень добычи сланцевой нефти к текущим ценам на нефть. Такие условия делают сланцевую нефть вполне конкурентоспособной на мировом рынке. Текущая средняя себестоимость сланцевой нефти во многом определяет нижний уровень мировых цен на УВ. Резкие увеличения этой базовой цены порождаются осложнениями военно-политической ситуации и другими рисками. Все это дает основание говорить о кардинальном изменении ситуации на рынке УВ и о начале эры сланцевой нефти.

Проблема вызванной сейсмичности

Однако ситуация с добычей сланцевых нефти и газа не столь радужная. Можно предполагать, что наступлению эпохи сланцевой нефти угрожает рост вызванной сейсмичности. Уже давно высказывались предположения, что некоторые землетрясения, в частности разрушительные Газлийские землетрясения (серия сильных землетрясений, произошедших 8 апреля и 17 мая 1976 г. и 20 марта 1984 г. вблизи города Газли в Узбекской ССР), были вызваны техногенными воздействиями при добыче УВ [1, 7 и др.]. Основанием для таких предположений служила, в основном, полная неожиданность возникновения здесь столь сильных землетрясений. Действительно, сейсмическая интенсивность при Газлийских землетрясениях достигала 8–9 баллов, в то время как ранее этому региону приписывалась сейсмическая активность не более 4 баллов. Но предположение о техногенной природе Газлийских землетрясений не получило серьезного обоснования, позднейшее заключение по этому вопросу сводилось к следующему: вряд ли кто возьмется отрицать наличие взаимосвязи между разработкой месторождений углеводородов и сейсмическим режимом, но насколько эта взаимосвязь значительна – остается вопросом [1].

Считается, однако, доказанным опасный рост сейсмичности в связи с добычей газа на гигантском голландском месторождении Гронинген [9]. Это месторождение было открыто в 1959 г. и длительное время являлось основой энергоснабжения Нидерландов и ряда соседних стран (https://neftegaz.ru/tech_library/view/4831-Groningen-gazovoe-mestorozhenie).

Первое землетрясение ($M_L=2.4$) произошло здесь в 1991 г. Землетрясение с магнитудой $M_L=3.6$ произошло в августе 2012 г. Землетрясение само по себе не сильное, но ввиду того, что район раньше полагался асейсмичным, антисейсмические требования при строительстве в расчет не принимались, поэтому даже такое землетрясение вызвало определенный ущерб. Сейсмическую опасность увеличило то обстоятельство, что в регионе распространены слабые грунты, на которых сейсмические колебания проявляются сильнее. Уже тогда специальная инспекция рекомендовала снизить годовую добычу на месторождении Гронинген. Слабые землетрясения продолжились, и под давлением общественности, а также под угрозой исков о возмещении ущерба к концу 2015 г. было принято решение об ограничении добычи. В самом начале 2018 г. произошло новое сильное землетрясение, после чего правительство Нидерландов приняло решение вдвое сократить добычу на месторождении Гронинген, а к 2030 г. и вовсе закрыть это некогда крупнейшее в Европе месторождение в целях уменьшения опасности, вызванной пусть и слабыми, но вполне ощутимыми, и даже разрушительными землетрясениями (<https://www.kommersant.ru/doc/3587562>).

Если опасная вызванная сейсмичность возникает на обычных УВ месторождениях, то тем более следует ее ожидать при разработке сланцевых нефти и газа, когда воздействие на пласт существенно сильнее. Действительно, при разработке обычных УВ месторождений следует ожидать изменений (в связи с отбором УВ и закачкой воды) порового давления в естественном поро-трещинном пространстве. При добыче же сланцевых нефти и газа происходит образование обширных новых систем трещин в исходно ненарушенных слабопроницаемых породах. В этом случае опасность возникновения вызванной сейсмичности представляется существенно большей. И действительно, многие авторы указывают на рост слабой сейсмичности в области добычи сланцевых нефти и газа в США и связывают этот рост с процессом добычи. Естественно, высказываются и противоположные мнения. Так, указывается, что слабая сейсмичность могла просто не фиксироваться в областях, полагавшихся ранее асейсмичными, поэтому

«рост» сейсмичности, скорее всего, может быть связан с установкой современных систем регистрации землетрясений.

Примеры вызванной сейсмичности

О масштабах техногенного воздействия на недра дают представление данные о расположении разрабатываемых провинций сланцевой нефти в США (рис. 1) и о расположении скважин, где используются современные технологии сильного воздействия на пласт (рис. 2). Сопоставление с картой плотности населения США показывает, что большая часть областей активной добычи сланцевой нефти на западе Северной Америки приходится на районы с относительно низкой плотностью населения. Однако многие районы добычи сланцевой нефти востока США и Канады имеют высокую плотность населения. Соответственно, последствия техногенных землетрясений здесь могут оказаться достаточно разрушительными. В первую очередь это касается района размещения нефтеносной провинции Марцелис и соседних с ней провинций (см. рис. 1).

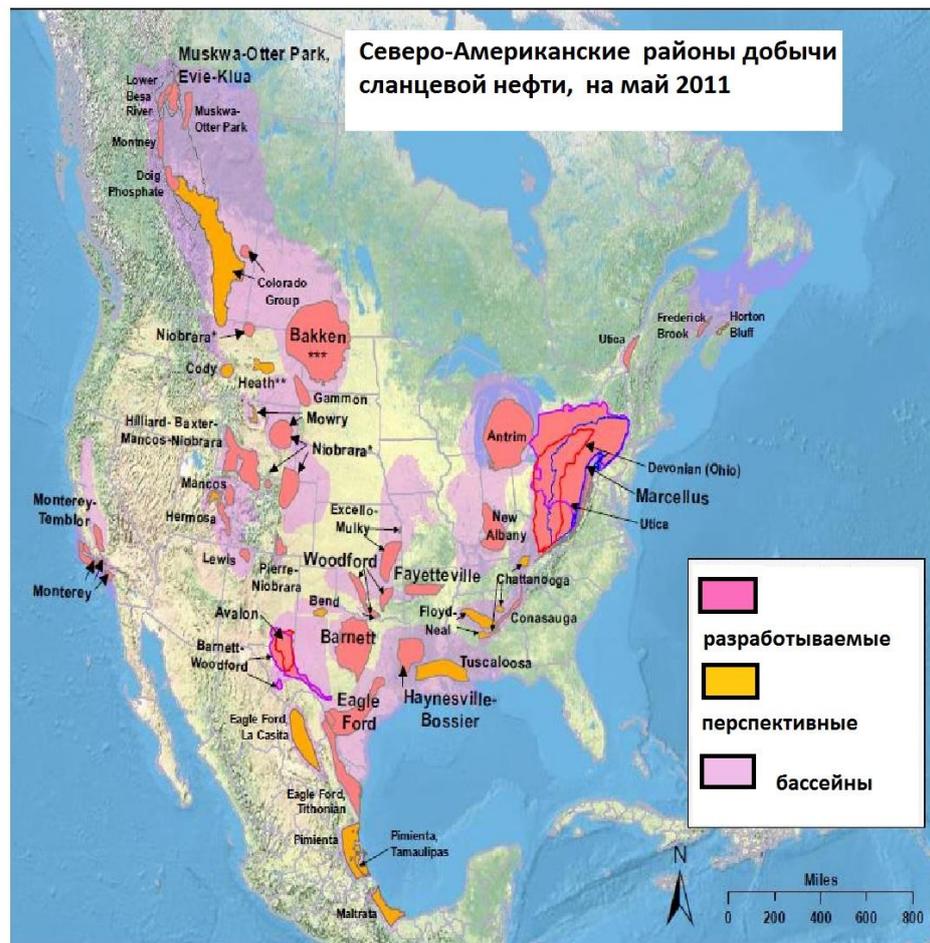


Рис. 1. Расположение зон добычи сланцевой нефти в Северной Америке, по [10], с упрощениями

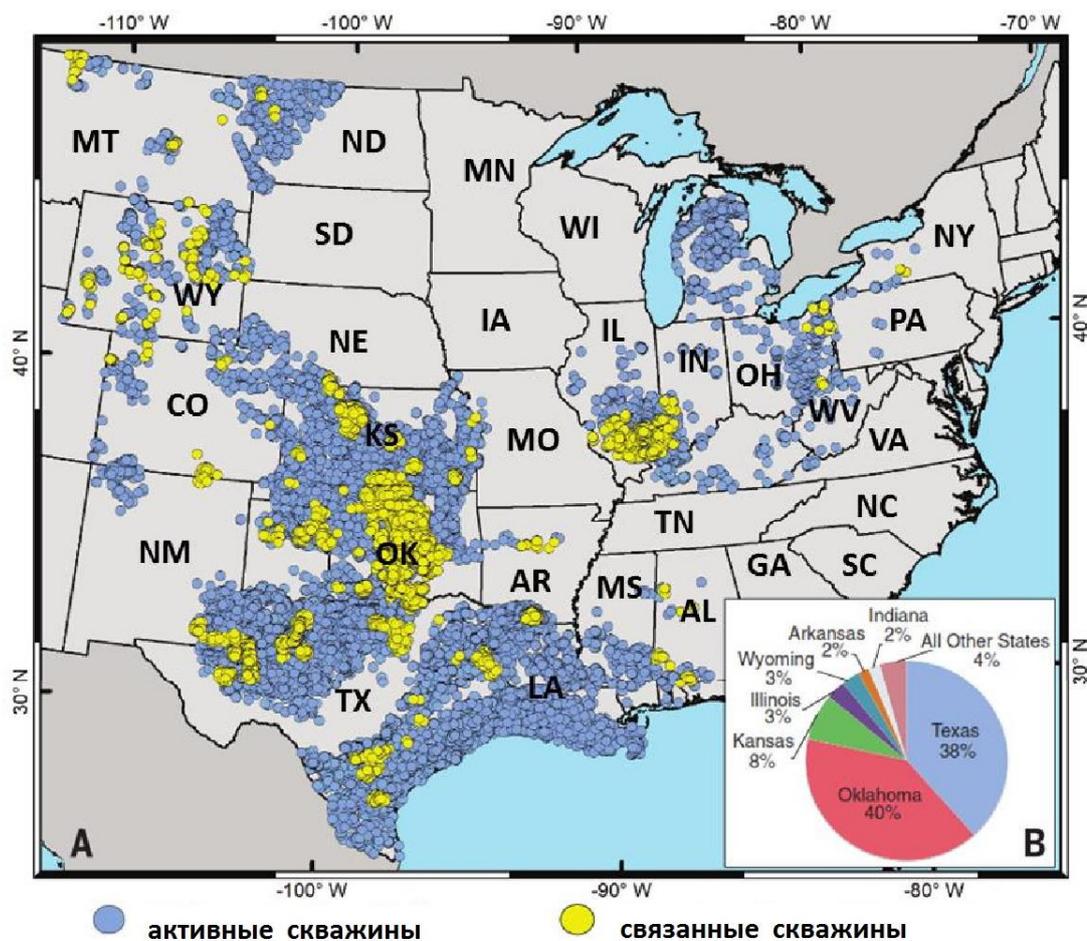


Рис. 2. Расположение всех добывающих и связанных скважин добычи сланцевой нефти, (связанная скважина – это скважина, за время работы которой на расстоянии не более чем 15 км от нее произошло землетрясение); справа дана доля таких скважин по штатам, по [10], с упрощениями

Сопоставление временных рядов хода сейсмичности и объемов нефте- и газодобычи для большинства рассматриваемых областей США и Канады не позволяет, однако, однозначно сделать вывод о росте сейсмичности и о вызванном техногенном ее характере. Достаточно определенно связь роста сейсмической активности и данных по объемам нефте- и газодобычи наблюдается, пожалуй, только для Оклахомы и наземных месторождений Техаса (заметим, что именно здесь максимальна и доля скважин, во время эксплуатации которых не далее 15 км произошли землетрясения, см. рис. 2). Для остальных 6 рассмотренных в [10] областей добычи сланцевой нефти США и Канады связь режима сейсмичности с режимом нефтедобычи отнюдь не очевидна. В ряде провинций при этом некоторый рост сейсмической активности приходится на начало добычи сланцевых УВ, а затем уровень сейсмичности снижается.

Предлагались и другие трактовки связи сейсмического режима с характером используемых технологий. Так, в работе [5] рост сейсмичности связывается с закачкой воды в определенном интервале глубин, в данном случае – с закачкой в области кровли фундамента. В целом, можно согласиться с тем, что предположение о техногенном и опасном росте сейсмичности в районах добычи сланцевой нефти США и Канады является весьма правдоподобным, но пока оно остается неподтвержденным.

Вполне очевидно, что проблема возможной связи роста сейсмичности с добычей сланцевых УВ весьма злободневна и актуальна. И вполне ожидаемо, что различные варианты ее решения могут быть затребованы нефтедобывающими или страховыми компаниями. Автору довелось обсуждать статью, представленную в *Bulletin of Seismological Society of America*, в которой аргументировалось отсутствие генетической связи между ростом сейсмичности и режимом нефтедобычи, хотя сам факт роста числа землетрясений и не оспаривался. Отсутствие генетической связи нефтедобычи и землетрясений обосновывалось тем, что землетрясения произошли в стороне от расположения скважин и что время возникновения землетрясений не соотносится с характером режима добычи. Такие аргументы, однако, не кажутся вполне убедительными. Действительно, ведь вызванные землетрясения могут происходить не только непосредственно на образованных при разрыве пластов трещинах, но и на соседних естественных разломных нарушениях, характер тектонической нагрузки на которых изменился в связи с техногенным воздействием на пласт или в связи с миграцией флюида. В этом случае моменты этих вызванных землетрясений будут запаздывать относительно вызвавших их техногенных воздействий на время, необходимое для передачи возмущения и накопление микроразрушений в области тектонического нарушения.

Иллюстрацией случая возникновения землетрясений на соседних разломных нарушениях, причем с запаздыванием относительно времени техногенного воздействия, могут служить данные о предположительно вызванной сейсмичности на Северном Сахалине [3]. Рассматривалась сейсмичность в окрестности работы скважины закачки (утилизации) промысловых вод на Северном Сахалине. Ввод скважины в строй и начало более детальной регистрации сейсмичности соответствуют 2006 г. В дальнейшем имело место увеличение объемов закачиваемой воды (авторы [6] подробностями режима закачки не располагают). На рис. 3, а, б приведены данные о временном ходе сейсмичности в окрестности скважины закачки и нормированные на год графики повторяемости

землетрясений до (1964–2006) и после (2013–2016) начала закачки (эти данные приведены для для большей территории). Первые землетрясения в окрестности нагнетающей скважины зарегистрированы в 2012 г. Сильнейшее землетрясение здесь имело магнитуду $M_L=4.1$. На рис. 3 видна активизация сейсмичности в 2012 г.; видно также, что интервалу времени предположительного развития вызванной сейсмичности отвечает в 3–4 раза более интенсивный поток землетрясений, чем средний фоновый режим сейсмичности 1964–2006 гг. (см. рис. 3, б).

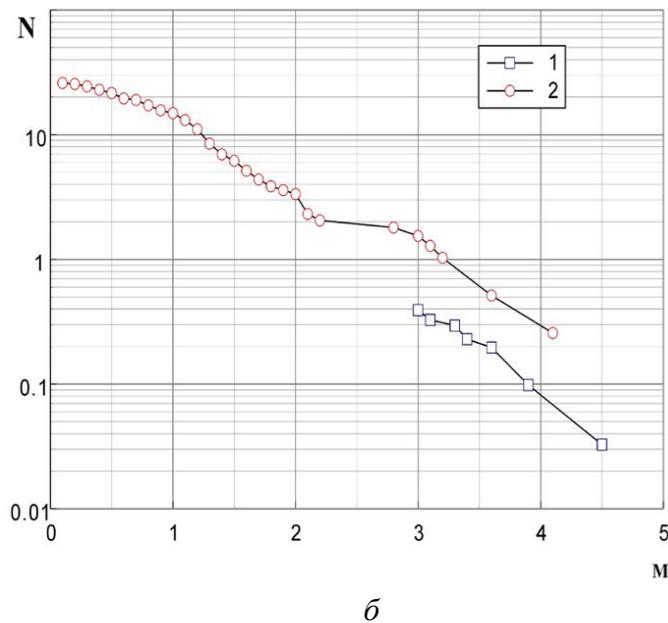
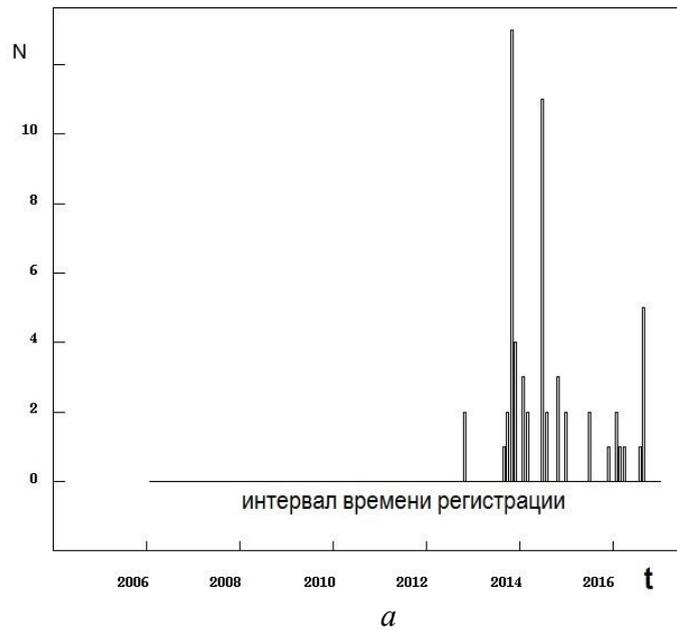


Рис. 3. Временной ход числа землетрясений вокруг нагнетающей скважины (а) и нормированные на год графики повторяемости землетрясений для более широкой окрестности области закачки воды (б); (1) – до начала закачки воды, (2) – после начала закачки, по [3]

На рис. 4 отмечены районы землетрясений, а также расположение нагнетающей скважины и находящихся поблизости разломных зон. Видно, что очаги землетрясений распадаются на две группы, концентрирующиеся вблизи нагнетательной скважины и проходящего здесь разлома северо-северо-восточного простирания, а также в области соседнего разлома северо-северо-западного простирания. На рис. 5 представлены данные по землетрясениям в координатах «расстояние от нагнетающей скважины» – «время, отсчитываемое от момента первого землетрясения, происшедшего в этой области в 2012 г.». Видна тенденция охвата сейсмической активизацией все более отдаленных от нагнетательной станции областей. Землетрясения, произошедшие на расстоянии более чем 15 км от нагнетательной станции, расположены в окрестности более удаленного от скважины разлома северо-северо-западного простирания. Аппроксимируя тенденцию распространения сейсмической активности линейной зависимостью, получаем оценку средней скорости распространения волны возмущения примерно 20 км за 3.3 года, т. е. примерно 6 км/год. Согласно предложенной в [6] модели, такая скорость смещения флюидного фронта соответствует проницаемости порядка $6 \times 10^{-13} \text{ м}^2$. Данное значение отвечает весьма высокой проводимости, но не невозможной в нашем случае, так как рассматривается распространение волны возмущения вдоль зоны разлома [2].

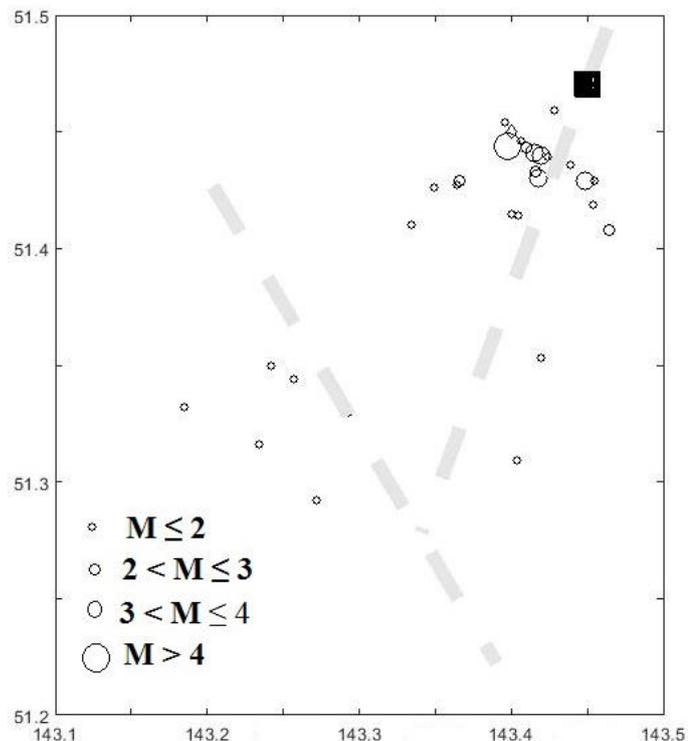


Рис. 4. Расположение землетрясений, нагнетательной скважины (черный квадрат) и разломных зон (толстые серые штриховые линии)

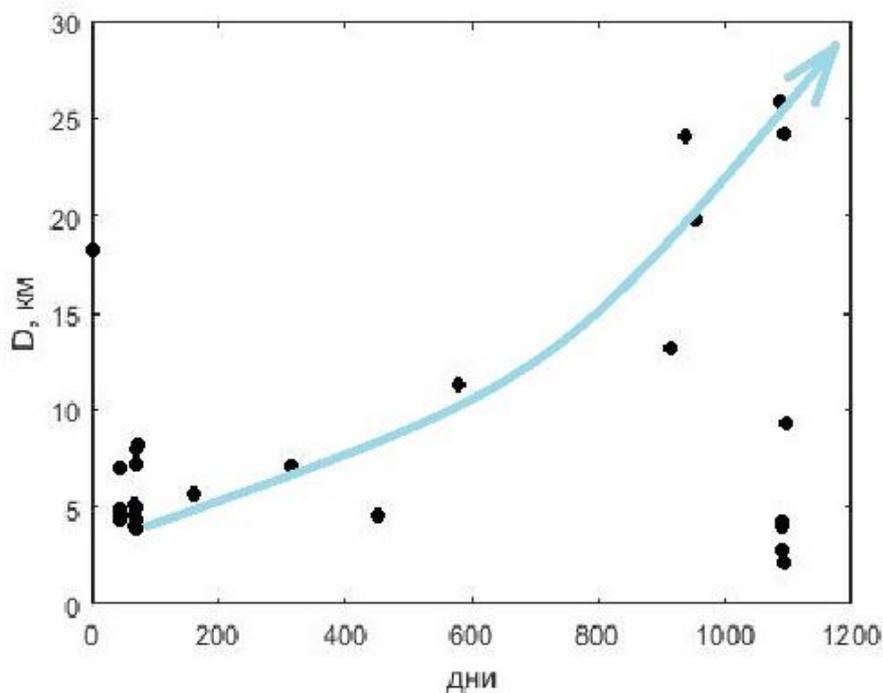


Рис. 5. Тенденция распространения фронта сейсмической активизации от станции закачки воды; расположение землетрясений в координатах «время» – «расстояние от нагнетательной станции» (точки) и тенденция распространения сейсмичности (линия со стрелкой)

Близкие по характеру особенности режима вызванной сейсмичности – задержка по времени и рост сейсмичности на соседних разломных зонах – наблюдались и в окрестности водохранилища Койна в Индии [4, 8]. Не трудно привести и другие примеры аналогичного характера режима вызванной сейсмичности.

Подводя итоги проведенного сопоставления, можно заключить, что, хотя вопрос об интенсивности и опасности вызванной сейсмичности остается в значительной мере открытым, сама возможность развития вызванной сейсмичности при газо- и нефтедобыче практически не вызывает сомнений. Следовательно, можно ожидать, что если связь землетрясений с разработкой сланцевой нефти будет дополнительно аргументирована и если вызванные землетрясения окажутся достаточно разрушительными, то цена потенциально возможных исков приведет к резкому росту себестоимости добычи и даже может сделать добычу сланцевой нефти нерентабельной.

Списывать со счетов особую роль стран – традиционных производителей нефти и газа преждевременно еще и потому, что нетрадиционная сланцевая нефть и нефть обычных УВ месторождений часто имеют общую природу. Отсюда можно ожидать, что перспективные с точки зрения добычи сланцевой нефти геологические формации будут часто оказываться в районах расположения обычных месторождений УВ. И

действительно, среди наиболее перспективных районов добычи сланцевой нефти, кроме ряда ставших уже традиционными районов ее добычи в США и Канаде, называются Оман, Сирия, Россия (Западная Сибирь). Таким образом, перспективными в плане добычи сланцевой нефти оказываются традиционные страны – производители нефти.

Авторы признательны А.В. Коновалову за предоставленную им возможность использования локального каталога по району нефтедобычи на Северном Сахалине.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Энергетика, динамика и дегазация Земли, теоретические и экспериментальные основы инновационных сейсмоакустических технологий исследования геологической среды и контроля за объектами нефтегазодобычи», № АААА-А16-116021510125-7).

ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В.В., Родионов В.Н., Турунтаев С.Б., Юдин А.Е. Сейсмичность месторождений углеводородов // Нефтегазовое обозрение. 2000. № 1. С. 4–15.
2. Жариков А.В., Лебедев Е.Б., Родкин М.В. Эпизоды лавинного роста проницаемости континентальной коры – эмпирические свидетельства и модель // 19-я Международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле»: Материалы конф. М., 2018. С. 124–127.
3. Коновалов А.В., Степнов А.А., Гаврилов А.В., Манайчев К.А., Сычев А.С., Клачков В.А., Сабуров М.С. Особенности региональной сейсмичности на севере о. Сахалин в связи с промышленным освоением месторождений нефти и газа на шельфе // История науки и техники. 2016. № 6. С. 63–71.
4. Смирнов В.Б., Chadha R.K., Пономарев А.В., Srinagesh D. Прогностические аномалии наведенной сейсмичности в области водохранилищ Койна – Варна, Западная Индия // Физика Земли. 2013. № 2. С. 94–109.
5. Hincks T., Aspinall W., Cooke R., Gernon T. Oklahoma’s induced seismicity strongly linked to wastewater injection depth // Science. 2018. Vol. 16, No. 359(6381). P. 1251–1255.
6. Miller S.A., Collettini C., Chiaraluce L., Cocco M., Barchi M., Kaus B.J.P. Aftershocks driven by a high-pressure CO₂ source at depth // Nature. 2004. Vol. 427. P. 724–727.
7. Simpson D., Leith W. The 1976 and 1984 Gazli, USSR, earthquakes, were they induced? // Bull. Seismol. Soc. Am. 1985. Vol. 75, No. 5. P. 1465–1468.

8. *Smirnov V., Chadha R.K., Ponomarev A., Srinagesh D., Potanina M.* Triggered and tectonic driven earthquakes in the Koyna – Warna region, Western India // *J. Seismol.* 2014. Vol. 18. P. 587–603.

9. *Van Thienen-Visser K., Breunese J.N.* Induced seismicity of the Groningen gas field: History and recent developments // *The Leading Edge.* 2015. Vol. 34, No. 6. P. 664–671.

10. *Van der Baan K., Calixto F.J.* Human-induced seismicity and large-scale hydrocarbon production in the USA and Canada // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* 2017. Vol. 18, No. 7. P. 2467–2485.