

## ЭНТРОПИЙНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СЛАНЦЕВОГО ГАЗА

Акопян С.Ц.

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник<sup>1</sup>  
sakopian@yandex.ru

1. Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

### Аннотация

В работе описываются возможности применения метода энтропийной сейсмологии для контроля микро-землетрясений (естественного и техногенного) происхождения, при разработке сланцевого газа. Этот метод позволяет выявить и контролировать образование разрывов в иерархии сейсмоактивных объемов геологической среды, ответственных как за сильные землетрясения, так и за умеренную и слабую сейсмичность. Метод может быть использован для решения технологических задач контроля динамики развития гидроразрыва пласта на месторождениях углеводородов. На основе метода можно решать задачи экологического контроля сланцевых разработок, снижения экологических рисков при бурении и повышения эффективности разработок.

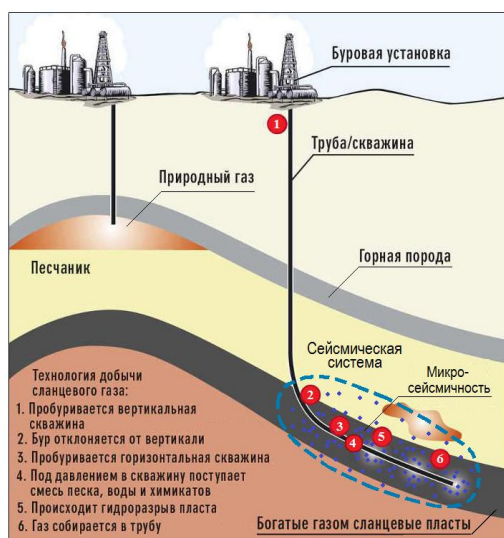
### Введение

Метод мониторинга и прогноза землетрясений на основе сейсмической энтропии, позволил автору разработать теорию энтропийной сейсмологии [5-7]. Эта теория позволяет контролировать развитие неустойчивости и образование разрывов в реальной геологической среде на основе сейсмостатистики. Было показано, что подготовка землетрясений происходит в пределах конкретных объемов литосферы *сейсмических систем* (СС). Для выявления СС были введены ряд кумулятивных параметров, зависящих от суммарной сейсмической энергии, выделившейся в среде за некоторый промежуток времени, и ее логарифма - энтропии. В [1,6] было показано, что развитие метода сейсмической энтропии от больших систем к малым и снижение пороговых магнитуд землетрясений до микроскопических (нано- магнитуды от -3 до 0, размеры десятки, сотни метров), позволит применять метод сейсмической энтропии для решения технологических задач в нефтегазовой отрасли. На примере Сахалина была описана возможность выявления техногенной составляющей, возникающей из-за нефтегазовых разработок, на естественные процессы подготовки сильных землетрясений. Техногенная составляющая может усилить магнитуду сильного землетрясения, или спровоцировать ее раньше времени в рамках СС. На основе регистраций микро-землетрясений естественного и техногенного происхождения, метод может быть использован для решения технологических задач контроля динамики развития гидроразрыва пласта (ГРП) на месторождениях углеводородов. В данной работе подробнее обсудим возможности применения метода сейсмической энтропии для разработки месторождений сланцевого газа [2]. Широкая география и масштабность этих разработок, усложненные способы добычи, экологические проблемы ставят новые задачи при организации этих разработок, отводят важное место их экологической безопасности [3,4].

### Сланцевый газ, экологические проблемы

Сланцевый газ находится в глубинных пластах Земли, в которых сложно вести добычу. Проницаемость плотных пород, сланца и угольных пластов значительно меньше, чем у песчаника, что приводит к сильному снижению дебита скважин и значительному удорожанию добычи сланцевого газа по отношению к природному. Сланцы есть почти в всех частях света однако достать из него топливо очень сложно. На Рис. 1 показана технология добычи сланцевого газа. Суть технологии заключается в повышении выхода сланцевых углеводородов методом ГРП. В скважину под большим давлением впрыскивается большое количество воды, и она разрывает пласт сланца. Также в скважину запускают крупнозернистый песок и химические вещества (бензол, толуол, соляная кислота и другие).

Эта технология увеличивает число разрывов, а за счет этого растет выход сырья [2]. Технология ГРП увеличивает срок жизни скважины до 2 лет, но этого недостаточно для окупаемости. Снижение темпов производства является основной экономической проблемой разработки сланцевого газа. Высокий уровень производства можно продлить на десятилетия, созданием сети скважин ГРП.



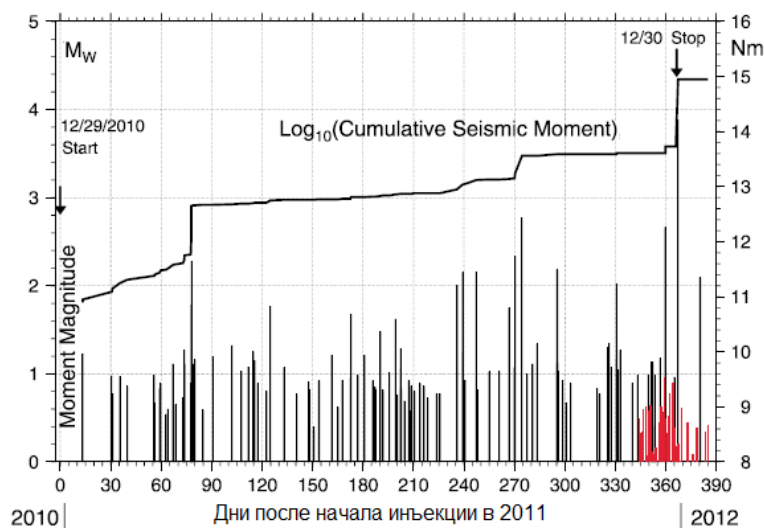
**Рис. 1.** Технология добычи природного и сланцевого газа. Пунктиром показана область микроземлетрясений, контролируемая в рамках СС.

Из экономических соображений в США сланцевый газ добывается в непосредственной близости от мест использования, и это приводит к образованию довольно густой сети скважин в обширных густонаселенных районах. Отсюда возникают экологические проблемы сланцевых разработок, связанные с методом ГРП. Операцию гидроразрыва на одной территории приходится повторять до 10 раз в год. Потенциальные экологические риски, такие как загрязнение подземного водоносного слоя, активизация сейсмической активности выходят на первый план. Несмотря на то, что ГРП проводятся гораздо ниже уровня грунтовых вод (Рис. 1), токсичные вещества проникают в них вследствие просачивания через трещины, образовавшиеся в толще осадочных пород при ГРП. На снижение этих рисков, в сущности, и направлены основные усилия в рамках развивающейся отрасли. Состояние дел за последние 5 лет в области разработки сланцевого газа изложено в работах [2-4].

#### **Активизация сейсмичности в местах разработки сланцевого газа**

В настоящее время, сланцевый газ в коммерческих объемах производится только в трех странах мира - США, Канаде и Китае. Всплеск сейсмической активности в 17 регионах 8 штатов - таков побочный эффект добычи нефти и газа методом ГРП, использовавшимся американцами для обеспечения "сланцевой революции". К таким выводам пришла Геологическая служба США, опубликовавшая доклад [10], посвященный росту числа землетрясений в стране. Увеличение темпа индуцированной сейсмичности с 2000 года наблюдалось в штатах Алабама, Колорадо, Арканзас, Нью-Мексико, Огайо, Канзас, Оклахома и Техас. Наиболее сильное землетрясение, потенциально связанное с инъекцией воды, имело магнитуду M5.7 и произошло в ноябре 2011 года в Оклахоме [8]. Землетрясение ощущалось в 17 штатах и нанесло ущерб в эпицентральной области. Американские геологи выяснили [11], что серия землетрясений в Техасе в 2013 и в 2014 годах могла также возникнуть в результате массивной закачки и откачки воды и нефтепродуктов из глубинных слоев во время нефте- и газодобычи в сланцевых отложениях. Согласно докладу Центра изучения Земли Колумбийского университета, сейсмологи, на основе исследований в штате Огайо, пришли к выводу, что технология гидравлического

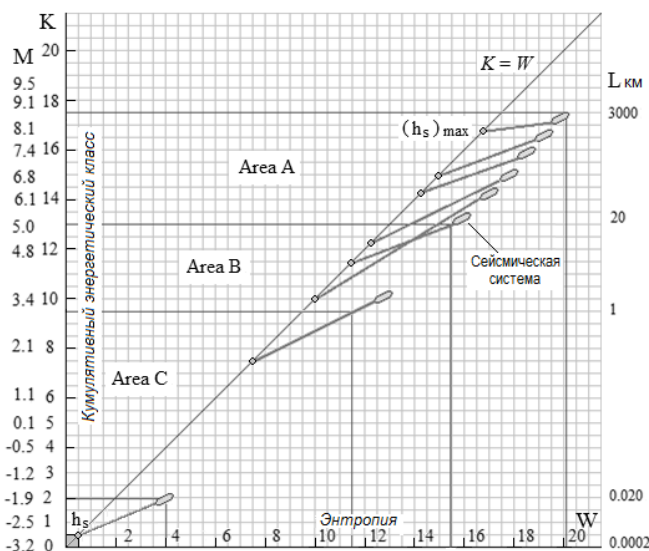
разрыва пластов может провоцировать землетрясения [9]. За время наблюдений с января 2011 по февраль 2012 было зафиксировано 109 толчков, сила самого крупного из которых составила 3,9 балла. На Рис. 2 показано наложение эффектов микро-сейсмичности в районе разработки сланцевого газа на естественную сейсмичность в районе Янгстаун (Огайо). Это привело к всплеску кумулятивного сейсмического момента.



**Рис. 2.** Землетрясения с 29.12.2010 по 01.2012 в районе Янгстаун (Youngstown) и индуцированная сейсмичность (красные события) зарегистрированные в декабре 2011 и январе 2012 портативными станциями.

### Энтропийный мониторинг и контроль зарождения микро-сейсмичности.

При разработке сланцевого газа представляет опасность разрушительные процессы в самом грунте, вплоть до сейсмической нестабильности и землетрясений. Актуальной задачей технологии ГРП является контролирование, предсказание и управление магистральной трещиной, определять по сейсмодатчикам, куда пойдет гидроразрыв. Эти задачи можно решать методом энтропийной сейсмологии. На Рис. 3 показан иерархический подход к процессам подготовки разно- масштабных разрывов в зависимости от размеров  $L$  СС.

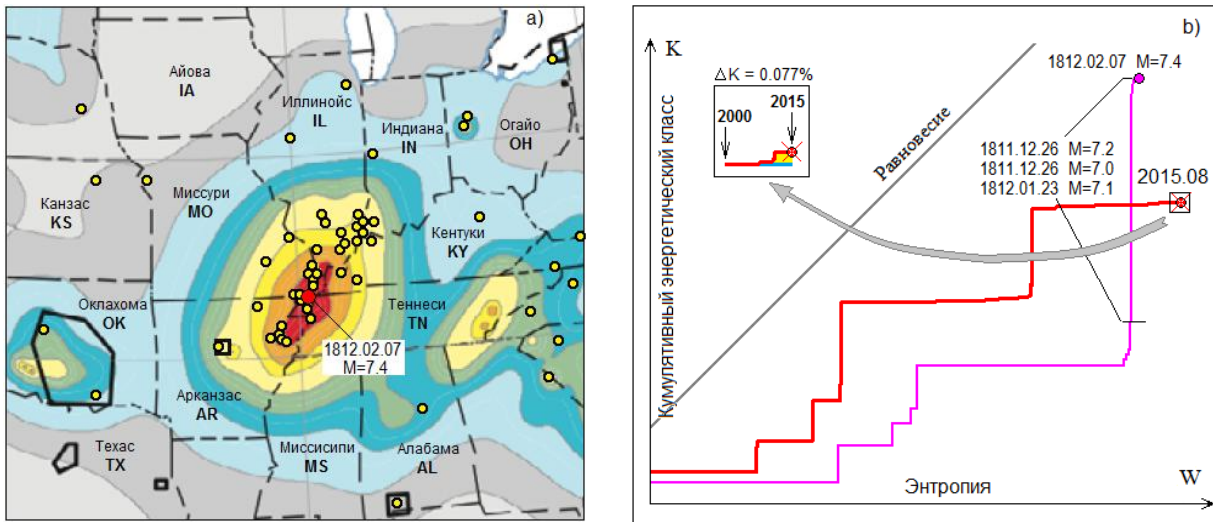


**Рис. 3.** Схематическая иллюстрация на трековой диаграмме иерархии аттракторов, при возрастании размеров СС и пороговых магнитуд. Возрастание параметра действия  $h_s$  показаны точками на диагонали равновесия. А - область землетрясений, вызывающих повреждения и разрушения; В – область, опасная для производственных сооружений, коммуникаций, нефтегазовых разработок; С – область микро-сейсмичности. Справа указаны характерные размеры системы.

На трековой диаграмме иерархия СС (аттракторы) разделена на три области А, В, С [5,6]. Как видно на Рис. 3, метрический параметр действия  $h_s$  (характеризующий фоновый размер трещины) возрастает, в связи с укрупнением размеров СС. Таким образом, для иерархии СС, включающих разломы разных масштабов, размер квантов энергии излучения землетрясений не одинаков. Они крошечны для маленьких СС с пороговыми магнитудами сильных землетрясений  $M_{th} = -1.8 - 3.3$  (область А на Рис. 3), средние для малых СС с  $M_{th} = 3.4 - 5.0$  (область В), и большие для СС с  $M_{th} = 5.1 - 9.0$  (область А). На языке длины разрыва в очагах землетрясений можно сказать, что самые маленькие СС имеют характерный размер  $\sim 10-30$  м, в которых микро землетрясения, имеющие разрывы в очагах  $\sim 22-150$  см, могут привести к разрывам от 2 до 4 метров. Начиная с таких маленьких размеров, системы в области С и В на Рис.3 могут контролировать локальные области трещинообразования в методе ГРП на глубине - в горизонтальном участке скважины (см. Рис.1). На основе метода сейсмической энтропии решаются две задачи: первая - экологический контроль сланцевых разработок, снижение экологических рисков при бурении; вторая - управление процессом ГРП и повышение эффективности разработок. Методически, вторая задача производится по технологии, описанной в [1]. Но в отличие от методов ГРП, применяемых при добыче нефти и природного газа, при добыче сланцевого газа возникают задачи повышения надежности и эффективности, из-за масштабности разработок (охватывающих густонаселенные области) и близкого расположения скважин. Поскольку разработка сланцевых газов может охватывать зоны со слабой и умеренной сейсмичностью [8-11], то методически подход для них будет отличаться от сейсмически спокойных областей. Для месторождений сланцевого газа вблизи слабой и умеренной сейсмичности необходимо предварительно выявить иерархию СС в энергетической области аттракторов В и С на Рис. 3 а далее их контролировать по уже разработанной компьютерной технологии для больших СС с аттракторами в области А. Такая технология уже отработана и апробирована на 130 СС по всему миру [6,7].

#### **Влияние наведенной сейсмичности на динамику подготовки сильных землетрясений.**

На примере СС Нью Мадрид (Рис. 4а) покажем, как слабая сейсмичность приводит к катастрофическим землетрясениям и как может влиять на этот процесс наведенная сейсмичность. Эта СС включает разломные зоны Нью Мадрид и Вабаш Валлей (New Madrid and Wabash Valley), расположенные в пограничной области штатов Иллинойс, Миссури, Арканзас, Теннесси, Кентукки и Индиана. Эта аномальная внутри плитовая сейсмоактивная зона известна тем, что в 1811 и 1812 здесь произошла вспышка каскада разрушительных землетрясений (Рис. 4а,б). Природа такой сейсмической активности объясняется тем, что здесь земная кора скрывает реликтовую рифтовую зону, которая периодически (в 250-500 лет) приводит к накоплению и разрядке напряжений. Сейсмологов интересует, когда здесь произойдет следующее сильное землетрясение с  $M > 7.0$  и сможет ли повториться картина 200 летней давности. Постараемся ответить на эти вопросы на основе метода сейсмической энтропии. На основе СС Нью Мадрид, можно восстановить возможный сценарий подготовки каскада разрушительных землетрясений (Рис. 4б). Во внутри плитовой зоне сейсмичность слабая и сейсмические процессы протекают значительно медленнее. В результате процесс подготовки катастрофических землетрясений растягивается на несколько столетий. На Рис. 4б видно, что три сильных землетрясения за два месяца существенно подняли трек подготовки катастрофического землетрясения в СС Нью Мадрид, восполнив дефицит кумулятивной энергии, и привели 7 февраля 1812 к сильному землетрясению с  $M = 7.4$ . На Рис. 4б также показан трек подготовки сильного землетрясения на 2015 год (масштаб изменен), который стартовал 203 года назад (после 1812 года). На врезке на Рис. 4б показано, что скачок кумулятивной энергии из-за наведенной сейсмичности за 2000-2015 гг. составляет 0.077%. При темпе роста энтропии, без наведенной сейсмичности, только к 2060 году энтропия превзойдет значение 18, после которого возможны землетрясения с  $M > 7.0$ . Наведенная сейсмичность приблизит опасный период на 5 лет. Аналогичный анализ применяется и при оценке влияния наведенной сейсмичности для иерархически малых СС.



**Рис. 4. а)** Умеренная сейсмичность на карте сейсмической опасности США, в районе исторических землетрясений Нью Мадрид. Многоугольниками показаны зоны наведенной сейсмичности. **б)** Трековая диаграмма СС Нью Мадрид. На врезке показан скачок трека (0.077%) из-за наведенной сейсмичности в 2000-2015 гг.

### Заключение

Техногенные эффекты, возникающие в результате вмешательства человека в жизнь земных недр при разработке нефти и газа незначительны по сравнению с теми массами пород, которые движутся на границах разломов. Тем не менее, они, накапливаясь, могут нарушить тонкий «баланс сил», существующий на линии столкновения пластов, и спровоцировать высвобождение накопившегося напряжения в виде землетрясений. Эти добавочные эффекты можно контролировать методами энтропийной сейсмологии, снижая экологический риск и повышая эффективность разработки.

### Литература

1. Акопян С.Ц. Применение метода сейсмической энтропии для решения технологических задач в нефтегазовой отрасли // *ROGTEC*, 2014. № 38, С. 56-63.
2. Геращенко И.О., Липидус А.Л. Сланцевый газ – революция не состоялась. *Вестник РАН*, 2014. Т. 84, № 5, с. 400-433.
3. Мельникова С., Сорокин С., Горячева А., Галкина А. Первые 5 лет «сланцевой революции»: что мы теперь знаем наверняка? // М: ИНЭИ РАН. 2012. 48 с.
4. Соловьянов А.А. Экологические последствия разработки месторождений сланцевого газа. М.: Зеленая книга. 2014. 60 с.
5. Akopian S.Ts. Open dissipative seismic systems and ensembles of strong earthquakes: energy balance and entropy funnels. *Geophys. J. Int.*, 2015. V. 201, p. 1618–1641.
6. Akopian S.Ts. & Kocharian A.N. Critical behaviour of seismic systems and dynamics in ensemble of strong earthquakes. *Geophys. J. Int.*, 2013, doi: 10.1093/gji/ggt398.
7. Akopian S.Ts. & Popov E.A. Monitoring induced seismicity based on seismic entropy method, *Abstracts, Induced seismicity ECGS – FKPE workshop*, 15-17 November, Luxembourg, 2010, p. 3-4.
8. Keranen, K.M., Savage, H.M., Abers, G.A., and Cochran E.S. Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA - Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence: *Geology*, 2013. V. 41, N 6, p. 699–702.
9. Kim W.-Y. Induced seismicity associated with fluid injection into a deep well in Youngstown, Ohio. *J. Geophys. Res.* 2013. V.118. p. 3506-3518.
10. Petersen M.D. et al. Incorporating Induced Seismicity in the 2014 United States National Seismic Hazard Model-Results of 2014 Workshop and Sensitivity Studies. U.S. Geological Survey, Open-File Report, Reston, Virginia, 2015. P. 1-64. <http://politrussia.com/news/slantsevaya-revoljutsiya-v-378/>
11. Rubinstein J.L., Mahani A.B. Myths and facts on wastewater injection, hydraulic fracturing, enhanced oil recovery, and induced seismicity. *Seism. Res. Lett.*, 2015. V. 86, N. 4. doi: 10.1785/0220150067.

## **Сведения об авторе**

**АКОПЯН Самвел Цолакович** — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, г. Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10.

Тел.: +7 (499) 254-90-95.

E-mail: [sakopian@yandex.ru](mailto:sakopian@yandex.ru)

AKOPIAN Samvel Tsolaki