

# Энтропийная сейсмология и ее применение при разработке сланцевого газа

С.Ц. Акопян

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

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

**В работе описываются возможности применения метода энтропийной сейсмологии для контроля микроземлетрясений 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 и повышения эффективности разработок сланцевого газа. Рассмотрено влияние наведенной сейсмичности на динамику подготовки сильных землетрясений в местах углеводородных разработок в центральной части США.**

## Материалы и методы

Мониторинг и прогноз естественной и индуцированной сейсмичности методами энтропийной сейсмологии.

## Ключевые слова

индуцированная сейсмичность, энтропия, анализ неустойчивости, микроземлетрясения

## 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, выделенной 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 микроземлетрясений 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 вприскивается 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

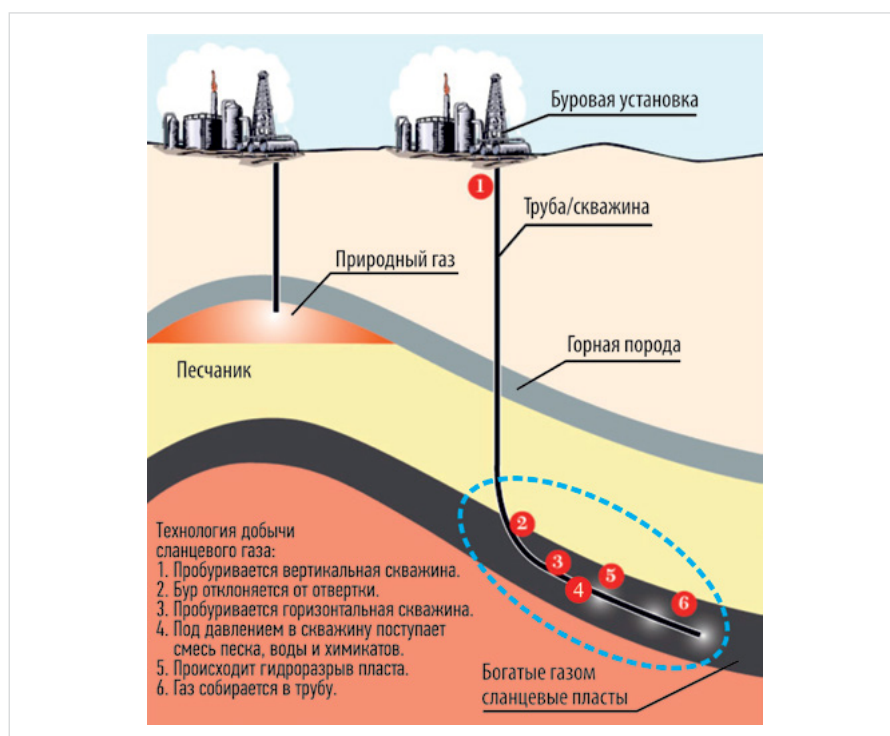


Рис. 1 — Технология добычи природного и сланцевого газа. Пунктиром показана область микроземлетрясений, контролируемая в рамках СС

недостаточно для окупаемости. Снижение темпов производства является основной экономической проблемой разработки сланцевого газа. Высокий уровень производства можно продлить на десятилетия, созданием сети скважин ГРП.

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 проводится 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 г. наблюдалось в штатах Алабама, Колорадо, Арканзас, Нью-Мексико, Огайо, Канзас, Оклахома и Техас. Наиболее сильное землетрясение, потенциально связанное с инъекцией воды, имело магнитуду  $M_{5.7}$  и произошло в ноябре 2011 г. 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 гг. 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 г. 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.

#### Энтропийный мониторинг и контроль зарождения микросейсмичности

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, определение по сейсмодатчикам, куда пойдет гидроразрыв. Эти задачи можно решать методом энтропийной сейсмологии. На рис. 3 показан иерархический подход к процессам подготовки разномасштабных разрывов в зависимости от размеров  $L$  СС. 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 микросейсмичности. Справа указаны характерные размеры систем.

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  $M = -1.8-3.3$  (область С на рис. 3), средние для малых СС с  $M = 3.4-5.0$  (обл. В), и большие для СС с  $M = 5.1-9.0$  (обл. А). На языке длины разрыва в очагах землетрясений можно сказать, что самые маленькие СС имеют характерный размер  $\sim 10-30$  м, в которых микросейсмичности, имеющие разрывы в очагах  $\sim 22-150$  см, могут привести к разрывам от 2 до 4 м. 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 (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].

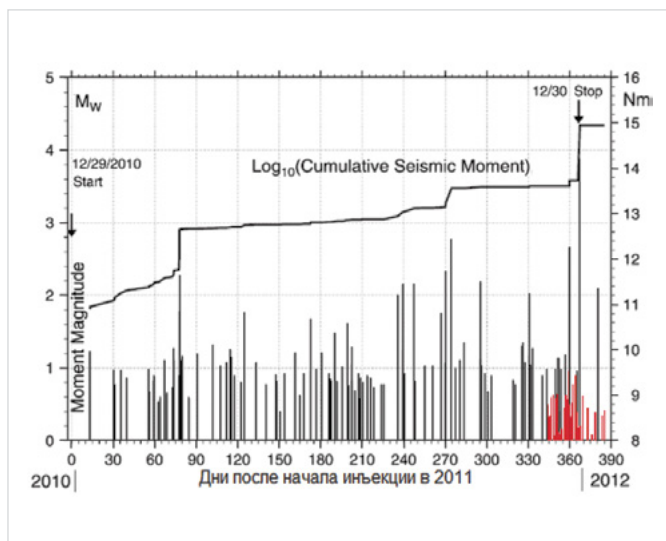


Рис. 2 — Землетрясения с 29.12.2010 по 01.2012 в районе Янгстаун (Youngstown) и индуцированная сейсмичность (красные события), зарегистрированные в декабре 2011 и январе 2012 портативными станциями

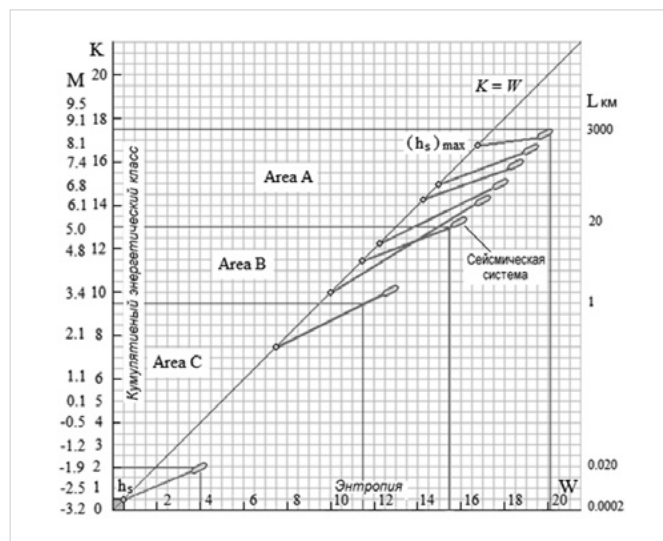


Рис. 3 — Схематическая иллюстрация на трековой диаграмме иерархии аттракторов, при возрастании размеров СС и пороговых магнитуд

### Влияние наведенной сейсмичности на динамику подготовки сильных землетрясений

На примере землетрясений в центральной части США покажем, как слабая сейсмичность может привести к катастрофическим землетрясениям и как может влиять на этот процесс наведенная сейсмичность [8–11]. Эта область включает разломные зоны Нью-Мадрид и Вабаш Валлей, расположенные в пограничной области штатов Миссури и Арканзас (рис. 4). Эта аномальная внутри плитовая сейсмоактивная зона известна тем, что здесь в 1811 и 1812 гг. произошла вспышка каскада разрушительных землетрясений. Природа такой сейсмической

активности объясняется тем, что здесь земная кора скрывает реликтовую рифтовую зону, которая периодически (в 250–500 лет раз) 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. Здесь была выявлена СС Нью-Мадрид с пороговой магнитудой 7.4, и две подсистемы с пороговыми магнитудами 7.0, охватывающие штаты Иллинойс, Миссури, Арканзас, Теннесси, Кентукки и Индиана (рис. 5а). Используя свойство

автомодельности СС, можно восстановить возможный сценарий подготовки каскада разрушительных землетрясений на рис. 4. Во внутри плитовой зоне сейсмические процессы протекают значительно медленнее, поэтому сейсмичность слабая. В результате процесс накопления и приближения энтропии к критическому значению растягивается на несколько столетий и происходит при малой кумулятивной энергии. Поэтому на конечном этапе происходит каскад сильных землетрясений.

На рис. 5б видно, что три сильных землетрясения за два месяца существенно подняли трек подготовки землетрясения в СС Нью-Мадрид, восполнив дефицит кумулятивной энергии за столетия, и 7 февраля 1812 г. привели к катастрофе. На рис. 5б также показан трек подготовки сильного землетрясения на 2015 г. (масштаб изменен), который стартовал 203 года назад (после 1812 г.). На врезке на рис. 5б показано, что скачок кумулятивной энергии из-за наведенной сейсмичности за 2000–2015 гг. ничтожный, составляет 0.077%. При сохранении темпа роста энтропии, без наведенной сейсмичности, энтропия достигнет критического значения к 2060 г., а с учетом наведенной сейсмичности этот срок сократится на полгода.

#### Итоги

Влияние наведенной сейсмичности с магнитудами  $M = 4.5-5.3$  на подготовку разрушительных землетрясений ничтожно, однако, возникновение самой наведенной сейсмичности в локальных участках разработок сланцевого газа может нанести большой хозяйственно-экономический ущерб. Наведенную сейсмичность можно контролировать и технологически предотвратить в малых СС на основе регистрации микросейсмичности с  $M < 3.0$ .

#### Выводы

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

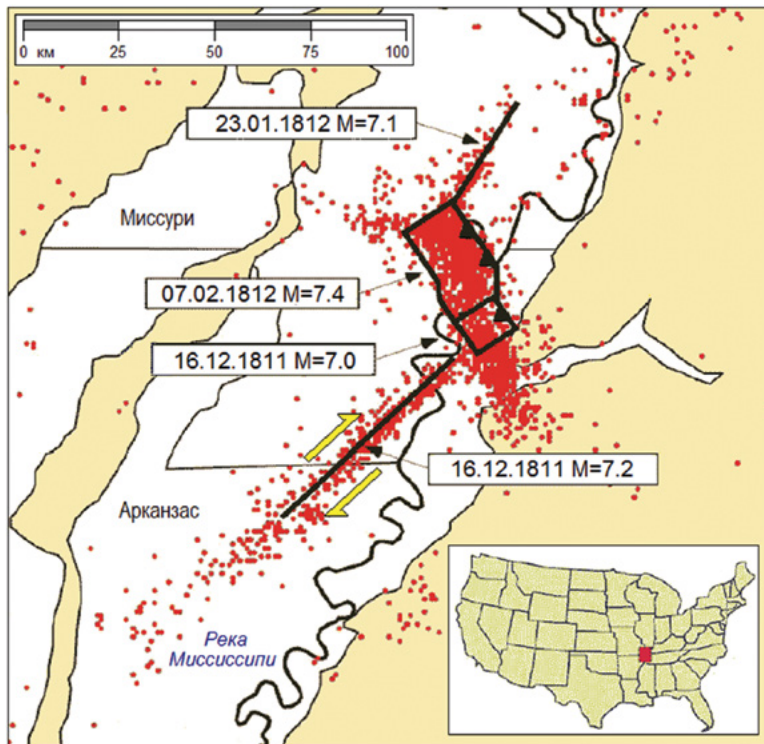


Рис. 4 — Каскад сильных землетрясений на разломе Нью-Мадрид (США)

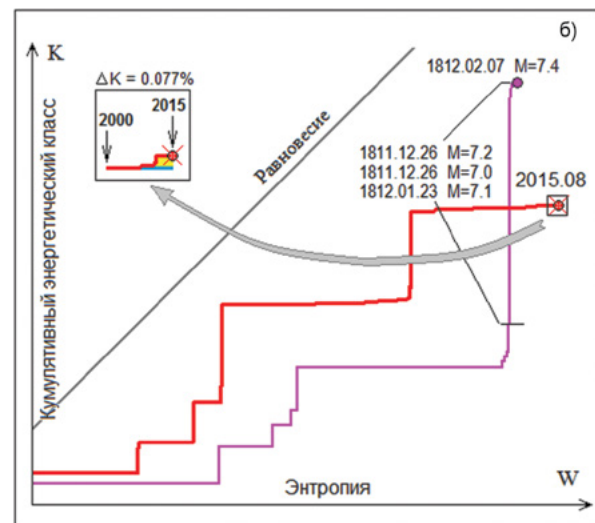
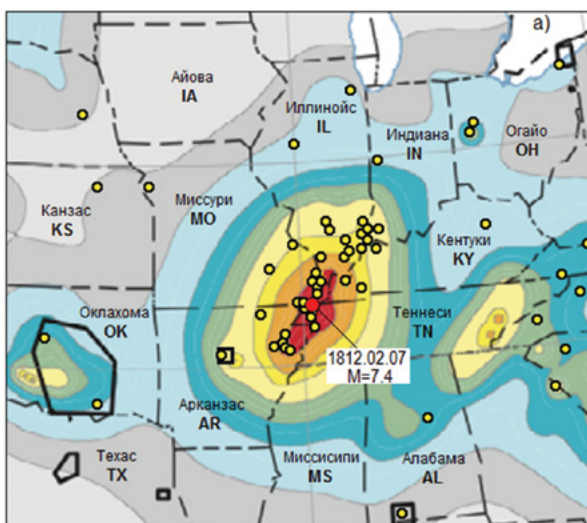


Рис. 5 — а) Умеренная сейсмичность на карте сейсмической опасности США, в районе исторических землетрясений Нью-Мадрид. Многоугольниками показаны зоны наведенной сейсмичности. б) Трековая диаграмма СС Нью-Мадрид. На врезке показан скачок трека (0.077%) из-за наведенной сейсмичности в 2000–2015 гг.

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.

#### Список используемой литературы

1. Акопян С.Ц. Применение метода сейсмической энтропии для решения технологических задач в нефтегазовой отрасли // *ROGTEC*. 2014. № 38. С. 56–63.
2. Герашченко И.О., Лapidус А.Л. Сланцевый газ — революция не состоялась // *Вестник РАН*. 2014. Т. 8. № 5. С. 400–433.
3. Мельникова С., Сорокин С., Горячева А., Галкина А. Первые 5 лет «сланцевой революции»: что мы теперь знаем наверняка? М.: ИФЗ 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. *Geophysical journal international*, 2015, Vol. 201, pp. 1618–1641.
6. Akopian S.Ts. & Kocharian A.N. Critical behaviour of seismic systems and dynamics in ensemble of strong earthquakes. *Geophysical journal international*, 2014, Vol. 196, pp. 580–599.
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, pp. 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, Vol. 41, issue 6, pp. 699–702.
9. Kim W.-Y. Induced seismicity associated with fluid injection into a deep well in Youngstown, Ohio. *Journal of Geophysical Research*, 2013, Vol. 118, pp. 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. pp. 1–64.
11. Rubinstein J.L., Mahani A.B. Myths and facts on wastewater injection, hydraulic fracturing, enhanced oil recovery, and induced seismicity. *Seismological Research Letters*, 2015, Vol. 86, issue 4, pp. 1060–1067.

ENGLISH

GEOPHYSICS

## Entropy seismology and its application in the development of shale gas

UDC 550.3

#### Authors:

**Samvel Ts. Akopian** — Sc.D., leading researcher<sup>1</sup>; [sakopian@yandex.ru](mailto:sakopian@yandex.ru)

<sup>1</sup>The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Science (IPE RAS), Moscow, Russian Federation

#### Abstract

The paper describes the application of the entropy seismology method for monitoring microearthquakes natural and technogenic origin in the development of shale gas. This method allows to detecting and monitoring the formation of gaps in the hierarchy of the seismically active volume of the geological environment, are responsible for a major earthquake, and for moderate and weak seismicity. The method can be used to solve technological problems of the control the dynamics of hydraulic fracturing on the deposits of hydrocarbons. The problems of environmental control and improve the efficiency of shale gas developments are can be solved based on the method. The effect on the dynamics of strong earthquakes

induced seismicity in areas of hydrocarbon development in the Central United State.

#### Materials and methods

Monitoring and forecast of natural and induced seismicity by the methods of seismic entropy.

#### Results

Effect of induced seismicity with magnitudes  $M = 4.5–5.3$  to prepare devastating earthquakes is negligible. However, the appearance of the induced seismicity in the local areas of shale gas development can cause great financial and economic damage. Induced seismicity can be monitored and technologically prevent in the small SS, on the basis of registration microseismicity ( $M < 3.0$ ).

#### Conclusions

Anthropogenic effects resulting by human intervention in the life of the earth's interior in the development of oil and gas is negligible compared with the mass of rocks that move on the borders of faults. However, its accumulate and can disrupt the delicate existing "power balance" on the line of collision layers, and trigger the release of accumulated stress in the form of earthquakes. These additional effects can be controlled by the methods of entropy seismology, reducing environmental risk and improving the efficiency of development.

#### Keywords

induced seismicity, entropy, instability analysis, micro-earthquakes

#### References

1. Akopyan S.Ts. *Primenenie metoda seysmicheskoy entropii dlya resheniya tekhnologicheskikh zadach v neftegazovoy otrasli* [Application of the method of seismic entropy to solve technological problems in the oil and gas industry]. *ROGTEG*, 2014, issue 38, pp. 56–63.
2. Gerashchenko I.O., Lapidus A.L. *Slantsevyy gaz — revolyutsiya ne sostoyalas'* [Shale gas - revolution did not take place]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2014, issue 5, pp. 400–433.
3. Mel'nikova S., Sorokin S., Goryacheva A., Galkina A. *Pervye 5 let «slantsevoy revolyutsii»: chto my teper' znaem navernyaka?* [First 5 years of the "shale gas revolution": what we now know for sure?]. Moscow: INEI of the Russian Academy of Sciences, 2012, 48 p.
4. Solov'yarov A.A. *Ekologicheskie posledstviya razrabotki mestorozhdeniy slantsevogo gaza* [Environmental impacts of the shale gas development]. Moscow: *Zelenaya kniga*, 2014, 60 p.
5. Akopian S.Ts. Open dissipative seismic systems and ensembles of strong earthquakes: energy balance and entropy funnels. *Geophysical Journal International*, 2015, Vol. 201, pp. 1618–1641.
6. Akopian S.Ts. & Kocharian A.N. Critical behaviour of seismic systems and dynamics in ensemble of strong earthquakes. *Geophysical Journal International*, 2014, Vol. 196, pp. 580–599.
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, pp. 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, Vol. 41, pp. 699–702.
9. Kim W.-Y. Induced seismicity associated with fluid injection into a deep well in Youngstown, Ohio. *Journal of Geophysical Research*, 2013, Vol. 118, pp. 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, Reston, Virginia, 2015, pp. 1–64.
11. Rubinstein J.L., Mahani A.B. Myths and facts on wastewater injection, hydraulic fracturing, enhanced oil recovery, and induced seismicity. *Seismological Research Letters*, 2015, Vol. 86, issue 4, pp. 1060–1067.