



# Применение метода сейсмической энтропии для решения технологических задач в нефтегазовой отрасли

## Application of Seismic Entropy to Increase Frac Efficiency

**С.Ц. Акопян**

Институт Физики Земли РАН, РФ, Москва

Метод сейсмической энтропии в настоящее время применяется для решения динамических задач подготовки и прогноза землетрясений. Он позволяет выявить иерархию сейсмоактивных объемов геологической среды, ответственных за сильные землетрясения, за образование разрывов в среде разного энергетического уровня. В работе описываются возможности применения этого метода, для контроля микроземлетрясений (естественного и техногенного) происхождения, для разработки системы контроля возникновения техногенных деформаций, разрывов, смещений, связанных с нефтегазовыми разработками. Метод может быть использован для решения технологических задач контроля динамики развития гидроразрыва пласта на месторождениях углеводородов.

### Введение

Метод мониторинга и прогноза землетрясений на основе сейсмической энтропии практически

**S.Akopyan**, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, RF, Moscow

*The seismic entropy method is currently used for earthquake forecasting. It enables us to show the seismic ranges of the geological environment which cause violent earthquakes and the formation of faults in an environment of diverse energy levels. This article describes the possibility of applying such methods to monitor micro earthquakes, both natural and manmade, in order to develop a control system over technogenic deformations and faults that can help in oil and gas production. This method may be applied to monitor the dynamics of hydraulic fracturing.*

### Introduction

The method of monitoring and forecasting earthquakes based on seismic entropy has been practically applied in different regions of the world since 2007. In order to describe the seismic processes that are happening in the earth, seismic entropy was introduced in 1993, where basis microearthquakes were facilitated. (Akopyan,

применяется для разных регионов мира с 2007 года. В 1993 году для количественного описания сейсмических процессов в реальных средах были введены физические параметры плотность состояния и энтропия, а в качестве кванта - элементарное микро землетрясение (Акопян, 1998, Akopian, 2013). Было показано, что подготовка землетрясений происходит в пределах конкретных объемов литосферы, названных сейсмическими системами (СС). Для выявления СС рассчитываются интеграл от суммарной сейсмической энергии, выделившейся в объеме геологической среды, и ее логарифм - энтропия. Введение элементарного микро землетрясения - кванта и новых параметров позволило перевести описание реальных процессов в математическую плоскость, которая выражается в построении энергетических и трековых диаграмм. В настоящее время выявлено более 130 СС и подсистем размерами от 20 до 3000 км с пороговыми магнитудами от 5.0 до 8.5. Развитие метода сейсмической энтропии от больших систем к малым и снижение пороговых магнитуд землетрясений (Akopian, Kocharian, 2013) до микроскопических (нано-магнитуды от -3 до 0, размеры десятки, сотни метров), позволит применять метод сейсмической энтропии для решения технологических задач в нефтегазовой отрасли. Мониторинг микросейсмичности и прогноз опасных толчков в иерархии геологических структур, позволит контролировать негативные сейсмические воздействия на важнейшие объекты (гидротехнические сооружения, атомные станции; топливно-энергетические, газонефтяные комплексы). Модификация программного обеспечения позволит контролировать слабые толчки, которые могут вызвать опасные повреждения и перебои в функционировании хозяйственно-индустриальных, топливно-энергетических объектов, коммуникаций (тоннели, мосты, горные выработки, плотины, газо- и нефтепроводы, скоростные транспортные коммуникации и т.д.). Система позволит предупредить зарождение малых деформаций на ранней стадии, предпринять соответствующие меры укрепления объекта и предотвращения нежелательных эффектов.

### **Применение метода для контроля индуцированной и триггерной сейсмичности естественного и техногенного характера в нефтегазовой области.**

Традиционная энергия, определяемая по записям сейсмических волн, может содержать влияние флюидов, искусственных и техногенных факторов в геологической среде, которые могут усилить или наоборот ослабить силу землетрясения. Сравнение энергии микросейсмичности по методу сейсмической энтропии с традиционными параметрами, регистрируемыми сейсмологическими

1998, Akopyan, 2013). It was shown that earthquakes develop within the specific volumes of the lithosphere (rock sphere), which are called seismic systems (SS). In order to detect SS, the value of the total seismic energy released within the geological environment is calculated. This value is called entropy. By introducing small earthquakes in to the calculations, it is possible to create accurate models and diagrams. Currently, over 130 SSs have been detected in subsystems ranging from 20 to 3000km, with magnitudes from 5.0 to 8.5 points.

The development of the entropy method from large to small scale systems, and the lowering of the earthquake magnitudes to microscopic levels (nano-magnitudes from -3 to 0, or only tens or hundreds meters in size), may make it possible to apply this method to solve technical problems in the oil and gas sector. The monitoring of micro seismic activity and the forecasting of tremors within the geologic structures may make it possible to control negative seismic impacts to critical manmade facilities (such as tunnels, bridges, mine workings, dams, gas and oil pipelines, thoroughways etc.) Indeed, this system may allow us to predict the origins of smaller geological deformations at their early stages and therefore take corresponding measures to reinforce facilities and prevent potential damage.

### **Applying the method to control and stimulate natural and technogenic earthquakes in oilfields**

Conventional energy, which is determined by the recording of seismic waves, may contain the impact of fluids, artificial and technogenic factors in the geologic environment, which may or may not increase the strength of an earthquake. Comparison of the micro seismic energy using seismic entropy with traditional characteristics, which are registered by seismological monitoring networks, makes it possible to recognize that fluid and technogenics are taking part in the process of earthquake development.

It was illustrated (Akopyan, Popov, 2010) that the catastrophic earthquake at Spitak, Armenia in 1988, might have been a triggered the construction of the nearby water storage facility in Akhuryan, which was constructed in 1983, as the epicentre was nearby.

During the course of the seasons, small water storage facilities have significant fluctuations of water level and pressure, unlike larger storage facilities. Bearing in mind these factors, and taking into account the natural fault line in the area, we can assume that these factors were a large part of the natural disaster that took place here. Based on this method, we can reveal a natural trigger mechanism for the earthquake of the Southern California on April the 4th, 2010 that measured 7.2. We can hypothesise that the

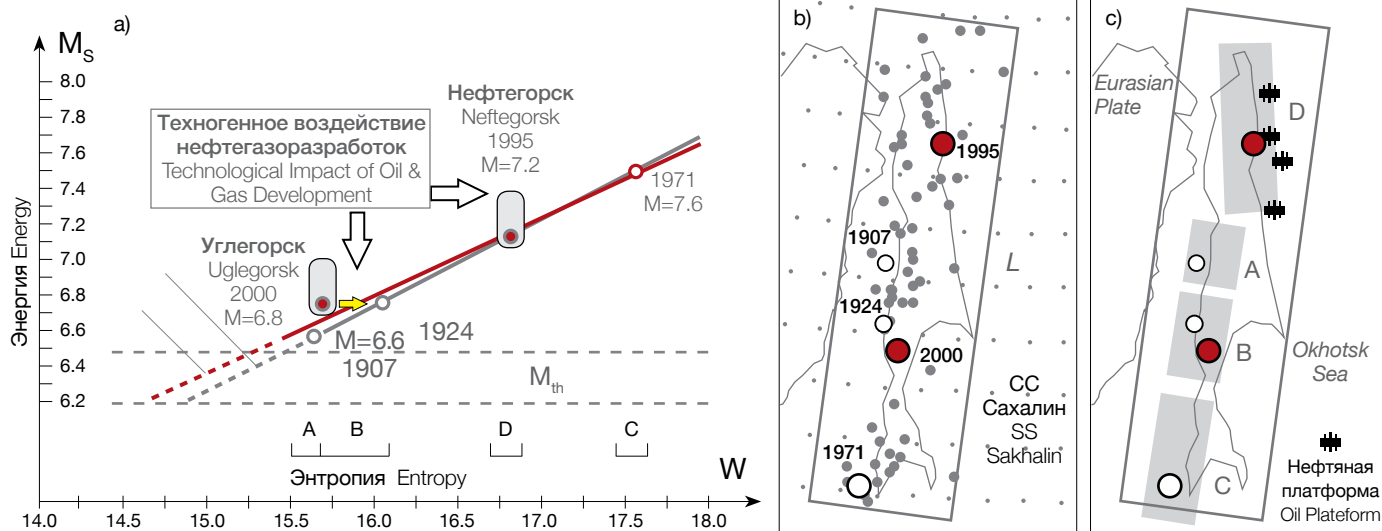
сетями наблюдений, позволяет выявлять флюидную, техногенную составляющую в подготовке землетрясения. Приведем примеры применения метода сейсмической энтропии для решения задач триггерной и индуцированной сейсмичности естественного и искусственного происхождения.

Было показано (Akopian, Popov, 2010), что катастрофическое Спитакское землетрясение 1988 в Армении могло являться триггерным. Очаговая зона Спитакского землетрясения была ослаблена Ахурянским водохранилищем, которое было введено в эксплуатацию в 1983, что совпадает с сейсмическим циклом накопления напряжений на Армянском нагорье (Akopian, 1990). В малых водохранилищах, в отличие от больших, в течении сезона происходят большие колебания уровня воды, вариации порового давления, что в неблагоприятных сейсмотектонических условиях на севере Армении мог сыграть роковую роль. На основе метода был выявлен естественный триггерный механизм землетрясения в Нижней Калифорнии от 4 апреля 2010,  $M=7.2$ . Землетрясение-индикатор от 30 декабря 2009,  $M=5.8$  вблизи Мехикалли приподняло трек подготовки сильного землетрясения, он попал в зону неустойчивости разлома Лагуна Салада, где и произошло спустя три месяца сильное землетрясение (Akopian, Popov, 2010). Метод была протестирована в Центре региональных геолого-геофизических

earthquake measuring 5.8 that took place in Mexicali on the December 30th 2009, touched an unstable zone of the faultline at Laguna Salada, causing a strong earthquake to take place 3 months later. (Akopian, Popov, 2010). The method was tested at the Regional Geological-and-Physical Research Center "GEON" in 1997 (Akopian, 1997). A joint analysis of seismicity and earthquake zones for the facilities of the fuel and energy complex in the Caspian area was carried out. As a result, we have maps of seismic hazards in different range of frequencies for velocities and accelerated velocities of the expected seismic forces, and an estimation of when they are likely to occur. The report forecasted earthquakes measuring from 6.2 for a period from 1998 to 2005 for the Caspian aquatic area and the neighboring countries. The earthquakes in the NW of Iran (1998.07.09, measuring 6.2) and in the western part of Turkmenistan (2000.12.06, measuring 7.5) were forecasted as well. Proof in the form of a letter, signed by L.Solodilov, D.Fyodorov, N.Kondorskay, is available.

As an example, an energy diagram of the SS in Sakhalin is presented here in Fig.1, including offshore mining in the SAKHALIN I-V zone (Akopian, 1998, Akopian, Kocharyan, 2013, Tsifra, 2008).

Fig.1a displays linear regression equations for the period before and after the earthquake at Uglegorsk in 2000 - see lines (1) and (2), correspondingly. The magnitudes



**Рис. 1:** Влияние нефтегазовых разработок на шельфе (САХАЛИН I-V) на землетрясения СС Сахалин. а) Энергетическая диаграмма: (1) до 2000г. и (2) после. Затемненные области обозначают разброс магнитуд. б) Землетрясения индикаторы с  $M > 5.0$  и конфигурация L системы Сахалин. в) Очаговые области A, B, C and D пяти сильных землетрясений ( $M > 6.2$ ) и платформы нефтедобычи

**Fig. 1:** The effect of offshore oil and gas production (SAKHALIN I-V) on the earthquake of SS Sakhalin. a) Energy diagram: (1) before 2000. and (2) after 2000. Shaded areas indicate the spread of magnitudes. b) The indicator earthquakes from  $M > 5.0$  and the L configuration of the Sakhalin system. c) focal areas A, B, C and D of the five strong earthquakes ( $M > 6.2$ ) and oil platform



исследований “ГЕОН” в 1997 году (Акопян, 1997). Был проведен совместный анализ сейсмичности и сейсмоопасных зон для объектов топливно-энергетического комплекса Каспийского бассейна. В результате были представлены карты сейсмической опасности в разных диапазонах частот для скоростей и ускорений ожидаемого сейсмического воздействия с оценкой наиболее вероятностных временных интервалов их проявления. В отчете были даны прогнозы землетрясений с  $M \geq 6.2$  на 1998-2005 гг для акватории Каспийского бассейна и прилегающих стран. Землетрясения на СЗ Ирана (1998.07.09,  $M=6.2$ ) и в западной Туркмении (2000.12.06,  $M=7.5$ ) там были предсказаны (имеется письмо за подписями Солодилова Л. Н., Федорова Д. Л., Кондорской Н.В).

В качестве примера, на Рис.1 приведена энергетическая диаграмма СС Сахалин, включающая разработки в шельфовой зоне САХАЛИН I-V (Акопян, 1998, Akopian, Kocharian, 2013, Цифра, 2008).

Показаны линейные уравнения регрессии, до и после Углегорского землетрясения 2000 года, линии (1) и (2) на Рис. 1а. Магнитуды Нефтегорского, 1995, и Углегорского, 2000, в сейсмической системе Сахалин имелся некоторый разброс (Рис.1а). Видно, что нижние значения магнитуд этих землетрясений лучше соответствуют уравнениям (1, 2). Это означает, что в сейсмических циклах этих землетрясений в системе Сахалин происходило некоторое усиление силы естественных тектонических землетрясений. Это могло произойти за счет вариации содержания естественных углеводородных флюидов (Акопян, Попов, 2010). Нефтегазодобыча на шельфе северного Сахалина начиналась с 1971 года и совпала с началом цикла подготовки Нефтегорского землетрясения. Она могла повлиять на естественные процессы и усилить магнитуду Нефтегорского землетрясения. Несмотря на то, что Углегорское землетрясение находится в центральной части Сахалина, за ее подготовку также отвечает вся система. Техногенные изменения в объеме системы могли нарушить естественный ход сейсмических процессов и ускорить подготовку Углегорского землетрясения 2000. Если б она произошла на несколько лет позже, то ее магнитуда лучше согласовалась бы на энергетической диаграмме. Метод сейсмической энтропии может дать весьма надежные результаты при включении в единую системы государственного мониторинга сахалинского шельфа (Красный и др., 1998, Красный, Храмушин, 2001).

### Энтропийно энергетический контроль динамики развития гидроразрывов пласта на основе микросейсмического облака.

Гидроразрыв пласта (ГРП) является одним из наиболее распространенных методов стимуляции

of the Neftegorsk earthquake in 1995 as well as those of the Ulegorsk one in 2000 indicate that the seismic system of Sakhalin had certain variations in its values (Fig.1a). We can see that the bottom values of these earthquake magnitudes within the seismic system of Sakhalin match the equations (1,2). This means that in certain places the strength of the earthquake will be greater, even within the one seismic system of Sakhalin. This could have happened due to the different natural hydrocarbon fluids within the oil and gas fields (Akopyan, Popov, 2010). Offshore oil and gas production north of Sakhalin began in 1971 and coincided with the start of the Neftegorsk earthquake. Indeed, work on the offshore fields might have impacted the natural processes and strengthened the magnitude of the Neftegorsk earthquake. In spite of the fact that the Ulegorsk earthquake was located in the central part of the Sakhalin, the whole seismic system was responsible for its origins. Technogenic changes in the volume of the system might have disturbed the natural current of the seismic processes and accelerated the origins of the Ulegorsk earthquake in 2000. If it had happened some year later, its magnitude would have fitted the energy diagram better. The seismic entropy method can provide reliable results when included into the unified system of the state monitoring of the Sakhalin offshore zone (Krasny and others, 1998, Krasny, Khrumushin, 2001).

### Using Seismic Entropy to Monitor Hydraulic Fracturing Dynamics

Hydraulic fracturing of formations (fracing) is one of the most popular methods of well stimulation in oil and gas fields, (Shmakov, 2012), and microseismic monitoring is applied to control fracs. In the work by Alexandrov and others in 2013 the accent is put on another feature of this technology, namely, on its application to control technological risks and the quality of the frac process.

To increase production efficiency, it has been suggested that we apply the entropy method to control the process of crack formation. This will enable us to visualize the frac process and monitor the injection process for any potential negative effects.

This technology is based on pre-testing, taking into account the location of the seismic survey system and the pattern of the oil and gas fields, and reveals the development dynamics of fractures with certain energy levels. The sources of seismic emission (“microseismic noise”) in the area of the formation that is being stimulated are caused by a changed in the energy balance resulting from the stress and strain of the rocks as fracturing took place. This method offers us the possibility to estimate the volume and control it, therefore preventing risks such as emergency shutdowns, water encroachment, etc. Using the case of the frac monitoring

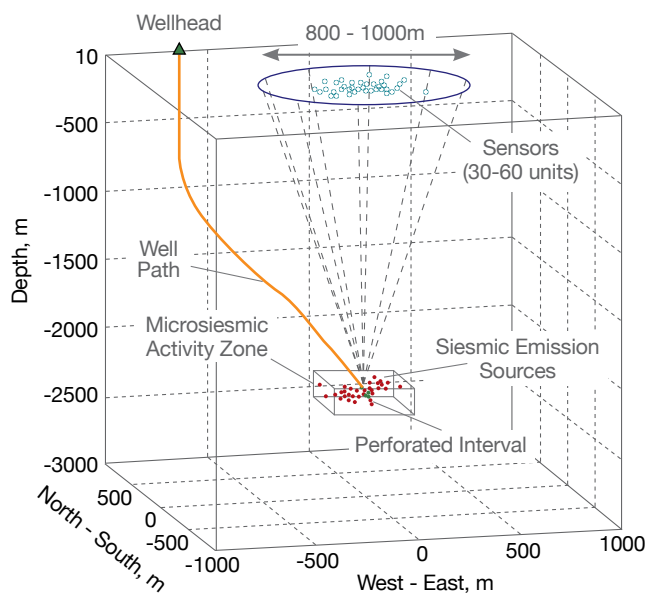
скважин на месторождениях углеводородов, который существенно увеличивает прирост добычи нефти (Шмаков, 2012). Для контроля ГРП применяется технология микросейсмического мониторинга. Обычно рассматривается задача определения направления простираения и размеров трещинной зоны, образующейся при ГРП. В работе (Александров и др., 2013) акцент делается на другой особенности этой технологии, а именно на ее применении для контроля технологических рисков и качества операций ГРП.

Для повышения эффективности нефтеотдачи и снижения риска негативных эффектов предлагается применять технологию динамического контроля над процессом трещинообразования на основе энтропийно энергетического метода. Это позволит визуализировать динамику процесса, управлять процессом закачки с целью образования требуемого разрыва и приостановить процесс при негативном развитии. Технология основана на предварительном тестировании (с учетом расположения сейсмической системы наблюдений и скважин на месторождении) с последующим осуществлением энтропийно энергетический контроль роя (облака) микросейсмических источников активности и выявления динамика развития разрывов определенного энергетического уровня. Источники сейсмической эмиссии («микросейсмических тресков») в зоне воздействия на пласт вызваны изменением энергетического баланса вследствие изменения напряженно-деформированного состояния некоторого объема пород при образовании разрыва. Метод позволяет оценить размеры этого информационного объема, контролировать ее и предотвращать технологические риски (аварийные остановки, обводнение пластов, отсутствие увеличения притоков пластовых флюидов и т.д.). На примере системы мониторинга ГРП приведенного на Рис.2 (Шмаков, 2012) покажем применение метода сейсмической энтропии.

Традиционный мониторинг, заключается в визуализации картины развития области микросейсмической активности во времени. Энтропийно энергетический метод позволяет по ходу времени прогнозировать развитие процесса и эффективнее управлять интенсивностью закачки флюида в скважину, добиваясь нужного развития трещины разрыва. На рис. 3 представлена гистограмма зарегистрированных микросейсмических событий (зеленый цвет), совмещенная с графиком давления на устье скважины (красный цвет) и графиком концентрации проппанта во время основного ГРП (синий цвет). Левая шкала показывает количество зарегистрированных событий, правая – давление в атм. и концентрацию в  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Время

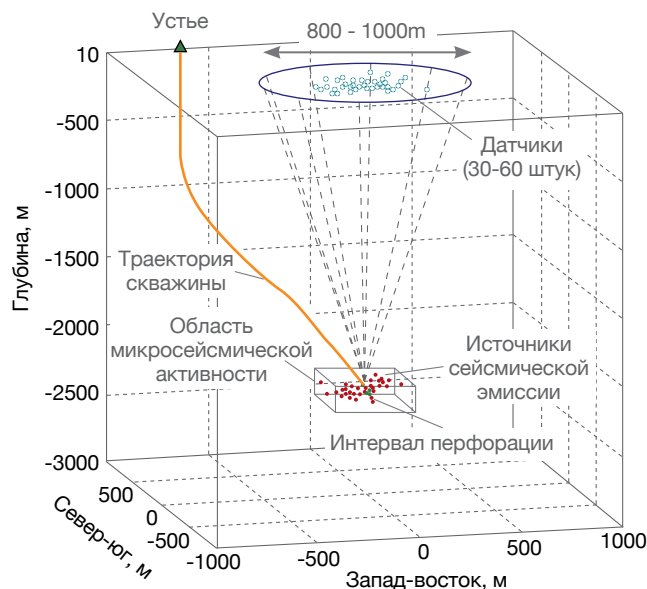
system, illustrated in Fig.2 (Shmakov, 2012) we can demonstrate the application of the seismic entropy method here.

Customary monitoring consists of visualizing the microseismic activity area. The entropy-energy method makes it possible to forecast the development of this process and more efficiently manage the intensity of injecting a fluid into a well, achieving the desired fracture. The Fig. illustrates a histogram of registered microseismic events (green color), superposed with the wellhead pressure plot (red color) and the plot of propping agent concentration in the course of the main frac (dark blue color). The left side scale indicates the number of registered events, while the right side scale shows the pressure in ATM and the concentration in  $\text{kg}/\text{m}^3$ . The origin of the microseismic activity sources is partially concordant with the plot of injecting in the process of the main frac. The maximum density is observed at the start of the frac, when the fissures are created during the initial period of injecting, at the stage of injecting propping agent, and during injecting the propping agent at the final stage of the process.



**Fig. 2:** Diagram of the surface-mounted microseismic surveillance system

Fig.4 illustrates a track diagram depicting the dynamics of this process based on the entropy method. The start of injecting, and the first and second strong activation of microseismicity make it possible to build-up an understanding of how the environment behaves and the dynamics of the micro seismic activity between these events. The wave of microseismic activity balances with its environment during the initial stages of proppant injection, and with that the seismic activity decreases.



**Рис. 2:** Схема наблюдения наземного микросейсмического мониторинга

образования источников микросейсмической эмиссии отчасти согласуется с графиком закачки при производстве основного ГРП. Максимальная

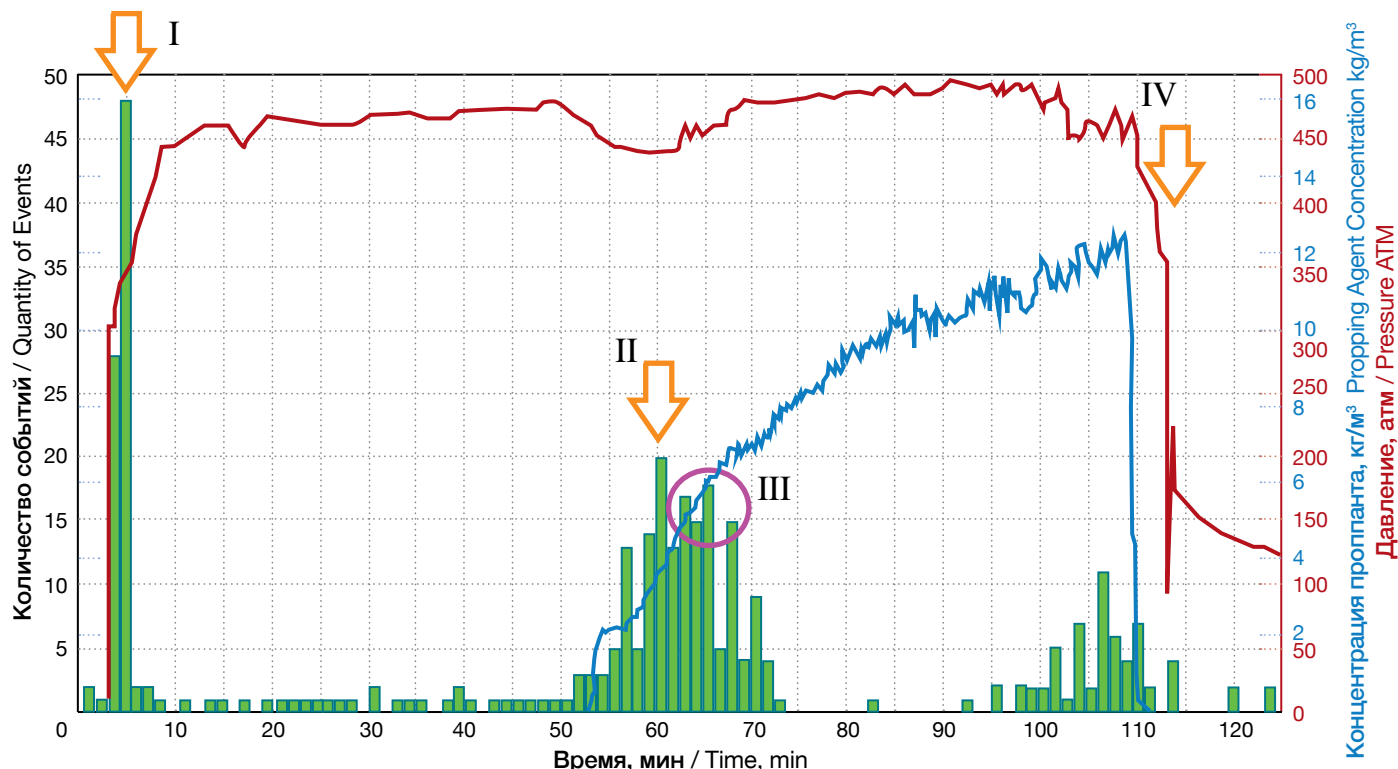
Judging by the location of the trajectory it is then possible to predict when it is going to enter a hazardous circle. In about thirty to forty minutes before the event it is possible to predict and manage the process. In the case discussed, the process was managed for an optimal outcome.

### Conclusions

We propose the introduction of seismic entropy, which is unique worldwide, to control minor earthquakes with magnitudes between 4.0-5.0, both natural and technogenic in the oil and gas sector. The system will prevent such deformations from forming at their early stage and will allow us to avoid any environmental disasters. The seismic entropy method is founded on the calculation of transient-free integral and cumulative variables, which can essentially increase the reliability of the results, when employed together with conventional methods of seismic surveillance for the development of oil and gas fields.

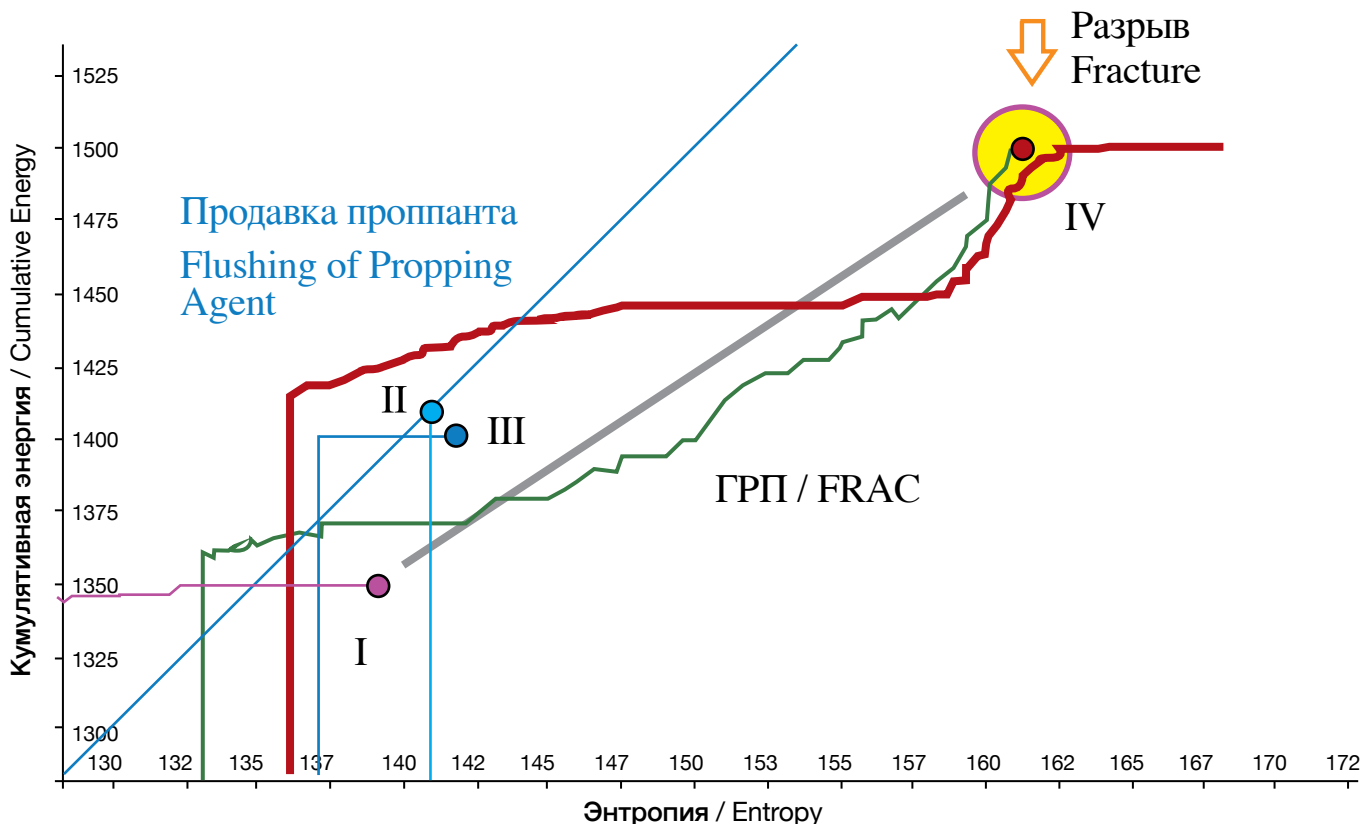
### Bibliography

Акопян С.Ц. Отчет "Выделение зон и участков ожидаемых сильных землетрясений ( $M \geq 6.2$ ) и оценка времени их проявления в пределах Каспийского бассейна". Москва, Фонды Центра РГГИ "ГЕОН",



**Рис. 3:** Гистограмма микросейсмических событий во время ГРП. Стрелками и кружком показаны наиболее информативные энтропийно энергетические участки.

**Fig. 3:** Histogram of microseismic events in the process of frac. Arrows and circle indicate the most informational entropy-energy sectors.



**Рис. 4:** Энергетическо-трековая диаграмма процесса ГРД. Показаны соответствующие стадии на гистограмме  
**Fig. 4:** The energy-track diagram of the fracturing process. The histogram presents all the corresponding stages

плотность событий наблюдается вначале ГРП, в процессе раскрытия трещины на начальном этапе закачки, на стадии закачки проппанта и во время подачи проппанта на последней стадии закачки.

На Рис.4 приведена трековая диаграмма динамики развития этого процесса по методу энтропии. Начало закачки, первая и вторая сильная активизация микросейсмичности, позволяют построить тестовую линию поведения среды и динамики развития микросейсмичности между этими событиями. На начальной стадии закачки проппанта, облако микросейсмичности приходит в равновесие со средой и микросейсмичность начинает спадать. Дальнейшее развитие динамики процесса отображает развитие траектории. По местонахождению траектории можно предсказать, когда она зайдет в опасный кружок. За тридцать сорок минут можно предсказать и управлять процессом, чтоб она сблизилась максимально к точке IV. В данном примере процесс развивался и управлялся правильно.

### Заключение

Предлагаем внедрить метод сейсмической энтропии, который не имеет аналога в мире, для контроля зарождения слабых толчков с  $M=4.0-5.0$  естественного и техногенного происхождения в нефтегазовой

1997, 80 с. (S.Akopyan Report on "Delineation of zones and sectors of expected massive earthquakes ( $M \geq 6.2$ ) and time evaluation of their development within the limits of the Caspian basin". Moscow, Fonds of the "GEON" Center under RGGI, 1997, 80pp.)

Акопян С.Ц. Количественное описание сейсмических процессов на основе сейсмической энтропии. Изв. РАН, Физика Земли, №1, 1998, с.11-26. (S.Akopyan "Quantitative description of seismic processes based on the seismic entropy method." The Russian Academy of Sciences Newsletter, Physics of the Earth, Issue 1, 1998, pp.11 to 26.)

Александров С.И., Мишин В.А., Буров Д.И. Наземный микросейсмический мониторинг гидроразрыва пласта: контроль качества и перспективы// Геофизика, 2013, № , С.31-34. (S.Alexandrov, V.Mishin, D.Burov "Land microseismic monitoring of hydraulic fracturing of formation: quality control and perspectives// Geophysics, 2013 Issue#, pp.31 to 34).

Красный М.Л., Храмушин В.Н., Шустин В.А., Воловский В.В., Громов А.Б., Золотухин Е.Г., Пицальник В.М. Пути создания системы мониторинга шельфа Сахалинской области. Сахалинское книжное издательство, Южно-Сахалинск, 1998, 208 с (М.



отрасли. Система позволит предупредить зарождение таких деформаций на ранней стадии и предпринять соответствующие меры укрепления объекта и предотвращать экологические катастрофы. Метод сейсмической энтропии основан на расчете устойчивых интегральных и кумулятивных параметров, которые могут существенно поднять надежность результатов при совместном использовании с традиционными методами сейсмического мониторинга при разработке нефтегазовых месторождений.

## Литература

Акопян С.Ц. Отчет “Выделение зон и участков ожидаемых сильных землетрясений (М\*6.2) и оценка времени их проявления в пределах Каспийского бассейна”. Москва, Фонды Центра РГГИ “ГЕОН”, 1997, 80 с.

Акопян С.Ц. Количественное описание сейсмических процессов на основе сейсмической энтропии. Изв. РАН, Физика Земли, №1, 1998, с.11-26.

Александров С.И., Мишин В.А., Буров Д.И. Наземный микросейсмический мониторинг гидроразрыва пласта: контроль качества и перспективы// Геофизика, 2013, № , С.31-34.

Красный М.Л., Храмушин В.Н., Шустин В.А., Воловский В.В., Громов А.Б., Золотухин Е.Г., Пищальник В.М. Пути создания системы мониторинга шельфа Сахалинской области. Сахалинское книжное издательство, Южно-Сахалинск, 1998, 208 с.

Красный М.Л., Храмушин В.Н. Единая система государственного мониторинга сахалинского шельфа как важнейший элемент обустройства морских акваторий. 2001. [Электронный ресурс] / <http://sakhgu.ru/expert/Geography/2001/04/Index.html>.

Цифра Р.А. Проекты «Сахалин-1» – «Сахалин-5» / Р.А. Цифра [Электронный ресурс] / Проблемы местного самоуправления. – Электрон. журн. – 2008. – №9. – Режим доступа: [samoupravlenie/31-08.php](http://samoupravlenie/31-08.php)

Шмаков Ф.Д. Методика обработки и интерпретации данных наземного микросейсмического мониторинга ГРП.//Технологии сейсморазведки, 2012, №3, с.65-72.

Akopian S.Ts., Seismoactive cycles and some date on the mechanism of the Spitak earthquake: Programm and Abstracts XXII Gen.Ass.ESC, Barcelona, 1990, p.107.

Akopian, S.Ts. Quantitative description of seismic processes in real medium and the algorithm of long-term prediction of large earthquakes: By examples of Armenian Upland, North-Western Iran, Italy, and Central California, Moscow, Triumph, 2013, p. 92.

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.

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.

Krasny, V.Khramushin, V.Shustin, V.Volovsky, A.Gromov, E.Zolotukhin, V.Pishchalnik. “Techniques for creating the system of seismic surveillance of the Sakhalin region shelf.” Sakhalin Publishing House, Yuzhno-Sakhalinsk, 1998, 208 pp.).

Красный М.Л., Храмушин В.Н. Единая система государственного мониторинга сахалинского шельфа как важнейший элемент обустройства морских акваторий. 2001. [Электронный ресурс] / <http://sakhgu.ru/expert/Geography/2001/04/Index.html> (M.Krasny, V.Khramushin “The Unified system of the state monitoring of the Sakhalin shelf as the most important element of offshore zone development. 2001.

Цифра Р.А. Проекты «Сахалин-1» – «Сахалин-5» / Р.А. Цифра [Электронный ресурс] / Проблемы местного самоуправления. – Электрон. журн. – 2008. – №9. – Режим доступа: [samoupravlenie/31-08.php](http://samoupravlenie/31-08.php) (R.Tsifra Projects “Sakhalin-1” – “Sakhalin-5” / R.Tsifra [Internet resource] / Problems of municipal government. – Electronic journal 2008 Issue #9. Access mode: [samoupravlenie/31-08.php](http://samoupravlenie/31-08.php))

Шмаков Ф.Д. Методика обработки и интерпретации данных наземного микросейсмического мониторинга ГРП.//Технологии сейсморазведки, 2012, №3, с.65-72 (F.Shmakov “The hydraulic fracturing land microseismic surveillance data processing and interpretation technique”./Seismic Survey Techniques, 2012, Issue#3, pp.65 to72.)

Akopian S.Ts., Seismoactive cycles and some date on the mechanism of the Spitak earthquake: Programm and Abstracts XXII Gen.Ass.ESC, Barcelona, 1990, p.107.

Akopian, S.Ts. Quantitative description of seismic processes in real medium and the algorithm of long-term prediction of large earthquakes: By examples of Armenian Upland, North-Western Iran, Italy, and Central California, Moscow, Triumph, 2013, p. 92.

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.

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.

### AKOPYAN Samvel Tsholakovich

Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Senior Research Officer, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. 123995, GSP-5 Moscow, D-242, Bolshaya Gruzinskaya ulitsa, 10