

Применение метода сейсмической энтропии для решения технологических задач в нефтегазовой отрасли

С.Ц. Акоюн

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник¹
sakopian@yandex.ru

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

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.

Материалы и методы

Мониторинг и прогноз землетрясений на основе сейсмической энтропии.

Ключевые слова

плотность состояния, энтропия, элементарное микроземлетрясение

Метод мониторинга и прогноза землетрясений на основе сейсмической энтропии практически 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 [2, 9]. 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 [10] до микроскопических (нано- магнитуды от -3 до 0, размеры десятки, сотни метров), позволяет 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 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 [11], что катастрофическое Спитакское землетрясение 1988 г. в Армении могло являться триггерным. Очаговая зона Спитакского землетрясения была ослаблена Ахурянским водохранилищем, которое было введено в эксплуатацию в 1983 г., что совпадает с сейсмическим циклом накопления напряжений на Армянском нагорье [8]. В малых водохранилищах, в отличие от больших, в течение сезона происходят большие колебания уровня воды, вариации порового давления, что в неблагоприятных сеймотектонических условиях на севере Армении мог сыграть роковую роль. На основе метода был выявлен естественный триггерный механизм землетрясения в Нижней Калифорнии от 4 апреля 2010 г., $M = 7,2$. Землетрясение-индикатор от 30 декабря 2009 г., $M = 5,8$ вблизи Мехикалли приподняло трек подготовки сильного землетрясения, он попал в зону неустойчивости разлома Лагуна Салада, где и произошло спустя три месяца сильное землетрясение [11]. Метод был тестирован в Центре региональных геолого-геофизических исследований «ГЕОН» в 1997 году [1]. Был проведен совместный

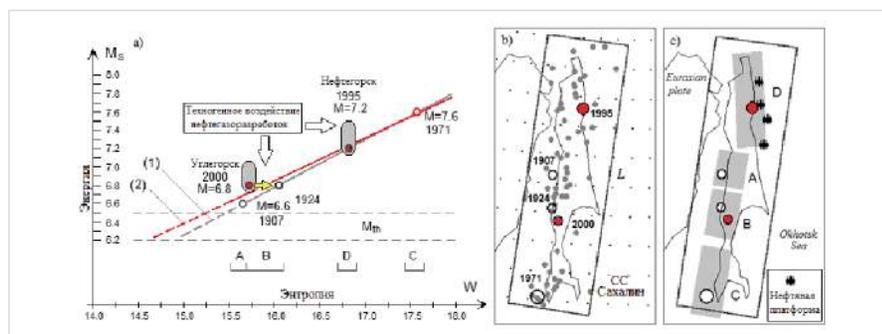


Рис. 1 — Влияние нефтегазовых разработок на шельфе (САХАЛИН I–V) на землетрясения СС Сахалин. а) Энергетическая диаграмма: (1) до 2000 г. и (2) после. Затемненные области обозначают разброс магнитуд. б) Землетрясения индикаторы с $M > 5,0$ и конфигурация L системы Сахалин. в) Очаговые области A, B, C and D пяти сильных землетрясений ($M > 6,2$) и платформы нефтедобычи

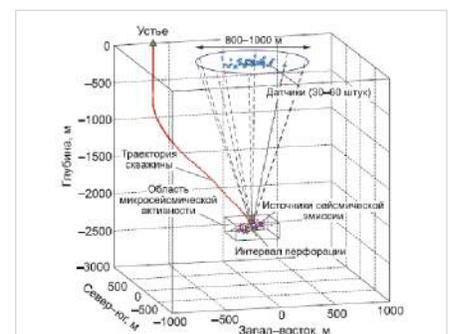


Рис. 2 — Схема наблюдения наземного микросейсмического мониторинга

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 разработку в шельфовой зоне САХАЛИН I–V [2, 6, 10].

Показаны линейные уравнения регрессии, до и после Углегорского землетрясения 2000 г., линии (1) и (2) на рис. 1 а. магнитуды Нефтегорского, 1995 г., и Углегорского, 2000 г., в сейсмической системе Сахалин имелся некоторый разброс (рис. 1 а). 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 [11]. Нефтегазодобыча на шельфе северного Сахалина началась 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 г. Если бы 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 систему государственного мониторинга сахалинского шельфа (Красный и др., 1998 г., Красный, Храмушин, 2001 г.).

Энтропийно-энергетический контроль динамики развития гидроразрывов пласта

на основе микросейсмического облака

Гидроразрыв пласта (ГРП) является одним из наиболее распространенных методов стимуляции скважин на месторождениях углеводородов, который существенно увеличивает прирост добычи нефти [7]. Для контроля ГРП применяется технология микросейсмического мониторинга. Обычно рассматривается задача определения направления простирания и размеров трещинной зоны, образующейся при ГРП. В работе [3] 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-энергетического контроля роя (облака) микросейсмических источников активности и выявления динамики 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 его 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 [7] покажем применение метода сейсмической энтропии.

Традиционный мониторинг, заключающийся 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, добываясь 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 kg/m^3 . Время образования источников микросейсмической эмиссии отчасти согласуется с графиком закачки при производстве основного ГРП. Максимальная плотность событий наблюдается вначале ГРП, в процессе закрытия 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 пойдет в опасный кружок. За тридцать – сорок минут можно предсказать и управлять процессом, чтобы она сблизилась максимально к точке IV. В данном примере процесс развивался и управлялся правильно.

Итоги

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.

Выводы

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 отрасли. Система позволит предупредить зарождение таких деформаций на ранней стадии и предпринять соответствующие меры укрепления объекта и предотвращать экологические катастрофы.

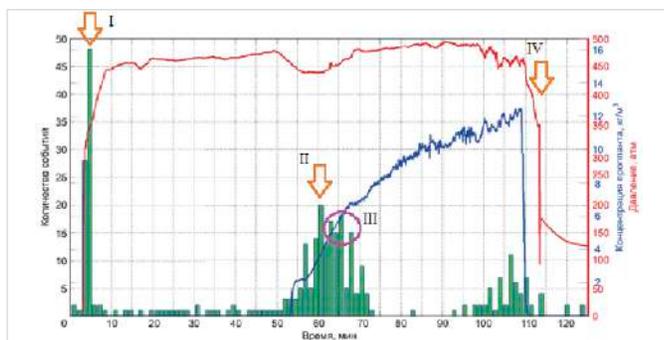


Рис. 3 — Гистограмма микросейсмических событий во время ГРП. Стрелками и кружком показаны наиболее информативные энтропийно-энергетические участки

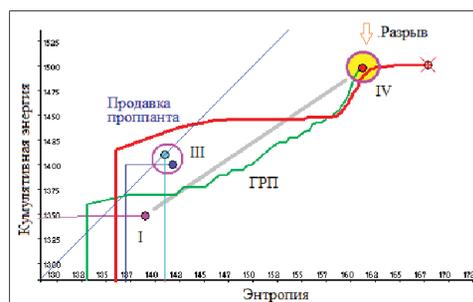


Рис. 4 — Энергетическо-трековая диаграмма процесса ГРП. Показаны соответствующие стадии на гистограмме

Автор статьи выражают большую благодарность д.т.н. профессору Е. А. Попову за научную и финансовую поддержку на протяжении многих лет, способствовавшую развитию метода сейсмической энтропии.

Список используемой литературы

1. 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, 1997. 80 с.
2. Акопян С.Ц. Количественное описание сейсмических процессов на основе сейсмической энтропии // Физика Земли. 1998. № 1. С. 11–26.
3. Александров С.И., Мишин В.А., Буров Д.И. Наземный микросейсмический мониторинг гидроразрыва пласта: контроль качества и перспективы // Геофизика. 2013. С. 31–34.
4. 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 // Южно-Сахалинск: Сахалинское книжное издательство, 1998. 208 с.
5. Красный М.Л., Храмушин В.Н. Единая система государственного мониторинга сахалинского шельфа как важнейший элемент обустройства морских акваторий. 2001. Режим доступа: <http://sakhgu.ru/expert/Geography/2001/04/Index.html> (дата обращения 11.09.2014).
6. Цифра Р.А. Проекты Сахалин-1 — Сахалин-5. Проблемы местного самоуправления. 2008. № 9. Режим доступа: <http://www.samoupravlenie.ru/31-08.php> (дата обращения 11.09.2014).
7. Шмаков Ф.Д. Методика обработки и интерпретации данных наземного микросейсмического мониторинга ГРП // Технологии сейсморазведки. 2012. № 3. С. 65–72.
8. Akopian S.Ts. Seismoactive cycles and some date on the mechanism of the Spitak earthquake: Programm and Abstracts XXII Gen.Ass.ESC. Barcelona: 1990, 107 p.
9. 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, 92 p.
10. Akopian S.Ts., Kocharian A.N. Critical behaviour of seismic systems and dynamics in ensemble of strong earthquakes. *Geophysical Journal International*, 2013. Available at: <http://gji.oxfordjournals.org/content/196/1/580.refs> (accessed 11 September 2014).
11. 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.

ENGLISH

GEOPHYSICS

UDC 550.3:550.8.05

Application of the method of seismic entropy to solve technological problems in the oil and gas industry

Author:

Samvel Ts. Akopian — ph.d., leading researcher¹; sakopian@yandex.ru

¹The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russian Federation

Abstract

Method of seismic entropy is currently used for solving dynamic training and earthquake prediction. It allows identify a hierarchy of seismically active volume of the geological environment, responsible for major earthquakes, for the formation of gaps among different energy levels. In this paper we describe the possibility of using this method for the control of microearthquakes (natural and man-made) origin for the development of the control system of man-made deformities, fractures, displacements associated with oil and gas developments. The method can be used to solve technological problems

controlling the dynamics of hydraulic fracturing for hydrocarbon deposits.

Materials and methods

Monitoring and prediction of earthquakes on the basis of seismic entropy.

Results

Method of seismic entropy is based on the calculation of sustainable integrated and cumulative parameters, which can significantly increase the reliability of the results when used in conjunction with traditional methods of seismic monitoring in the development of oil and gas fields.

Conclusions

Propose the introduction of the method of seismic entropy, which has no analogue in the world, to control the birth of weak shocks with $M = 4.0–5.0$ natural and technogenic origin in the oil and gas industry. The system will prevent the emergence of such strains at an early stage and take appropriate measures to strengthen the object and prevent environmental disasters.

Keywords

density of state, entropy, elementary microearthquake

References

1. Akopyan S.Ts. *Otchet: Vydelenie zon i uchastkov ozhidaemykh sil'nykh zemletryaseniy ($M \geq 6.2$) i otsenka vremeni ikh proyavleniya v predelakh Kaspiyskogo basseyna* [Report: Isolation zones and areas of expected strong earthquakes ($M \geq 6.2$) and the estimate of the time of their manifestations in the Caspian Basin]. Moscow: Funds of RGGI GEON Center, 1997, 80 p.
2. Akopyan S.Ts. *Kolichestvennoe opisanie seysmicheskikh protsessov na osnove seysmicheskoy entropii* [A quantitative description of seismic processes on the basis of seismic entropy]. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 1998, issue 1, pp. 11–26.
3. Alexandrov S., Mishin V.A. Burov D.I. *Nazemny mikroseymsicheskiy monitoring gidrorazryva plasta: kontrol' kachestva i perspektivy* [Ground microseismic monitoring of hydraulic fracturing: quality control and prospects]. *Geophysics*, 2013, pp. 31–34.
4. Krasnyy M.L., Khrumushin V.N., Shustin V.A., Volovskiy V.V., Gromov A.B., Zolotukhin E.G., Pishalnik V.M. *Puti sozdaniya sistemy monitoringa shel'fa Sakhalinskoy oblasti* [Towards the creation of a system for monitoring the shelf of Sakhalin Oblast]. *Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalinskoe knizhnoe izdatel'stvo*, 1998, 208 p.
5. Krasnyy M.L., Khrumushin V.N. *Edinaya sistema gosudarstvennogo monitoringa sakhalinskogo shel'fa kak vazhneyshiy element obustroystva morskikh akvatoriy* [Unified system of state monitoring of the Sakhalin shelf as an essential element arrangement of maritime]. 2001. Available at: <http://sakhgu.ru/expert/Geography/2001/04/Index.html> (accessed 11 September 2014).
6. Tsifra R.A. *Sakhalin-1 – Sakhalin-5 projects. Problemy mestnogo samoupravleniya* [Problems of local government]. 2008, issue 9. Available at: <http://www.samoupravlenie.ru/31-08.php> (accessed 11 September 2014).
7. Shmakov F.D. *Metodika obrabotki i interpretatsii dannykh nazemnogo mikroseymsicheskogo monitoringa GRP* [Methods of data processing and interpretation of ground microseismic monitoring hydraulic fracturing]. *Tekhnologii seismorazvedki*, 2012, issue 3, pp. 65–72.
8. Akopian S.Ts. Seismoactive cycles and some date on the mechanism of the Spitak earthquake: Programm and Abstracts XXII Gen.Ass.ESC. Barcelona: 1990, 107 p.
9. 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, 92 p.
10. Akopian S.Ts., Kocharian A.N. Critical behaviour of seismic systems and dynamics in ensemble of strong earthquakes. *Geophysical Journal International*, 2013. Available at: <http://gji.oxfordjournals.org/content/196/1/580.refs> (accessed 11 September 2014).
11. 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.