

УДК 550.8/504.06

# МОНИТОРИНГ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА АКВАТОРИИ

И.А. Чиркин<sup>1</sup>, Е.Г. Ризанов<sup>2</sup>,  
С.В. Каляшин<sup>1</sup>, С.О. Колигаев<sup>1</sup>,  
А.А. Радван<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Международный университет  
природы, общества и человека  
«Дубна»,

<sup>2</sup>ООО «Институт новых нефтегазовых  
технологий»

Экспериментальные исследования показали, что существует возможность предотвращения на акваториях экологических катастроф, возникающих в результате внезапных выбросов нефти из скважин (при их бурении или испытании) и техногенных мелкофокусных землетрясений (при разработке месторождений).

**Ключевые слова:** *микросейсмическая эмиссия, экологическая безопасность, нефтяное месторождение, донная сейсмическая антенна.*

## ВВЕДЕНИЕ

Экологическая безопасность является главным приоритетом при разведке и разработки нефтяных месторождений на акваториях. Если исключить человеческий и технический факторы и оставить геологический, то можно считать, что существуют две основные причины экологических катастроф.

Первая причина – открытое фонтанирование скважины нефтью в процессе ее бурения или испытания за счет резкого разгазирования раствора и/или существенного увеличения давления на забое. В практике бурения и испытания скважин эти случаи не редки, но на суше они не приводят к таким экологическим последствиям, как на акваториях. Здесь нефть растекается на площади в сотни и даже тысячи квадратных километров. Недавний случай в Мексиканском заливе, а ранее в Северном море, являются наглядными примерами подобных экологических катастроф.

## MONITORING OF MICROSEISMIC EMISSION FOR ENSURING ECOLOGICAL SAFETY OF OFFSHORE OILFIELD EXPLORATION AND DEVELOPMENT

I.A. Chirkin, E.G. Rizanov,  
S.V. Kalyashin, S.O. Koligayev,  
A.A. Radwan

Experimental studies showed a possibility to prevent offshore ecological disasters caused by sudden oil blowouts from wells (during drilling and testing) and technogenic shallow-focus earthquakes (when developing oilfields).

**KEYWORDS:** *microseismic emission, ecological safety, oilfield, ocean-bottom seismic array.*

Вторая причина – техногенные землетрясения, которые возникают при разработке нефтяных и газовых месторождений, когда в результате изменения геостатического и пластового давлений происходит перераспределение напряженного состояния в геологической среде. В этом случае активизируется процесс трещинообразования и на глубинах 3–7 км интенсифицируются смещения блоков, что сопровождается излучением сейсмических волн, создающих землетрясения. Такие техногенные мелкофокусные землетрясения наблюдались на Старогрозненском (в 1971–1973 гг.), Ромашкинском (в 1994 и 2008 гг.) и других месторождениях в России и за рубежом. На суше эти землетрясения (с интенсивностью в эпицентре 3–4 балла) не имеют катастрофических последствий, т. к. не создают масштабных разрушений, но на акваториях они могут формировать разрушительные цунами уже с катастрофическими последствиями.

Для решения указанных экологических проблем предлагается долговременный мониторинг волн микросейсмической эмиссии (МСЭ), которые непрерывно возникают в геологической среде в процессе «раскрытия-схлопывания» трещин. По результатам наблюдения пространственно-временной активности (интенсивности) МСЭ на площади месторождения и сопряженной территории появляется возможность выделения зон (очагов) аномально высокого напряженного состояния геосреды, которые являются первопричиной катастроф, как при бурении скважин, так и при внезапном возникновении землетрясений.

#### МОНИТОРИНГ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА АКВАТОРИЯХ И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ

Для изучения пространственно-временного (4D) распределения очагов МСЭ специалистами научной школы нефтегазовой сейсмоакустики профессора О.А. Кузнецова создана инновационная сейсмическая технология «Сейсмолокация очагов эмиссии» (СЛОЭ) [1]. В настоящее время технологию СЛОЭ используют, в основном, для контроля техногенного воздействия и изучения флюидной структуры месторождений на суше, но подготовлен проект ее применения и на акваториях для непрерывного и неограниченного во времени мониторинга МСЭ с целью решения широкого спектра задач, включая экологические [2].

Для наблюдения волн МСЭ и сейсмического шума, в т. ч. для контроля бурения скважин (КБС), используют донную площадную систему, состоящую из одной или нескольких сейсмоакустических антенн

с датчиками упругих колебаний (3С-геофонами и гидрофонами). Антенна имеет кольцеобразную форму (спираль, тор, окружность и др.), в которой относительно равномерно расположены датчики.

Принципиальная схема локатора СЛОЭ представлена на рис. 1. Основные технико-технологические характеристики геофизического комплекса СЛОЭ-мониторинга, применяемого на акватории, приводятся в табл. 1.

Выделение волн МСЭ (в регистрируемом сейсмическом волновом поле) и позиционирование их источников осуществляют по принципу локатора пассивного типа, имеющего точечную характеристику направленности за счет фокусирующего обзора. Пример характеристики направленности в точке обзора геосреды для антенны с формой тора (три вложенные окружности) представлен на рис. 2.

Результатом обработки сейсмической информации является 4D-распределение значений энергии МСЭ в течение всего или отдельного периода времени наблюдения. На рис. 3 показан временной ряд значений энергии МСЭ, полученных в одной из точек обзора (в исследуемом объеме геосреды) в течение 168 часов непрерывного мониторинга. Каждое значение временного ряда соответствует дискретному интервалу наблюдения, обычно 10 с.

На рис. 4 представлен пример 3D-поля средней энергии МСЭ (площадь 14 км<sup>2</sup>, интервал глубин 2700–3300 м) за 2-дневный период непрерывного СЛОЭ-мониторинга сейсмического волнового поля. Информация о пространственно-временной динамике

изменения открытой трещиноватости содержит сведения о местоположении и изменениях (размеров, интенсивности и пр.) локальных аномалий напряженного состояния геосреды, что необходимо для решения экологических задач прогноза аварийноопасных интервалов бурения и зарождающихся очагов («зародышей») землетрясений.

#### ПРОГНОЗ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ БУРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ СКВАЖИН

Проблема внезапного отрывного фонтанирования скважины связана с заходом ее ствола в зону аномально высокой открытой трещиноватости. При этом такая зона должна иметь субвертикальную структуру с глубокими корнями заложения (на несколько километров). Этот критерий установлен в результате

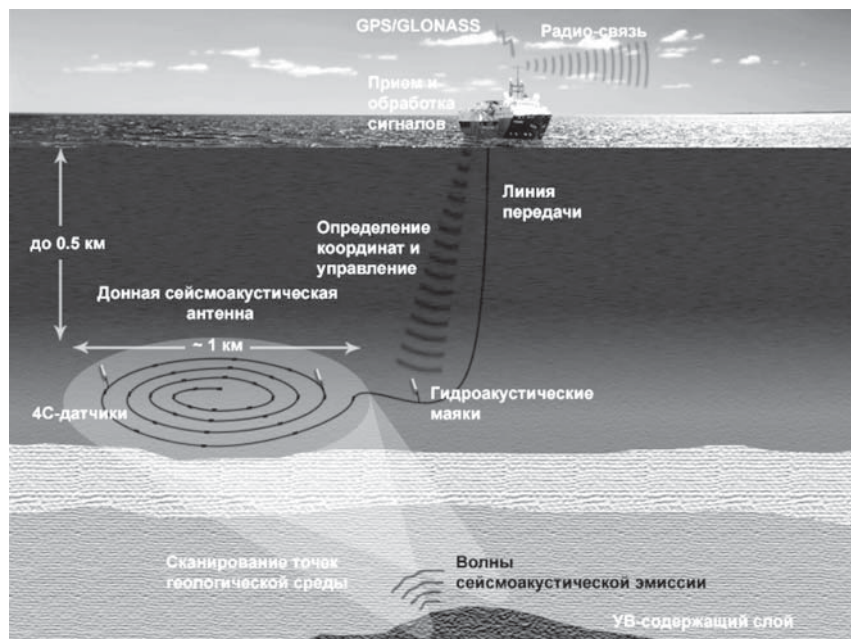


Рис. 1.

Принципиальная схема наблюдения по технологии СЛОЭ на акватории

ТАБЛИЦА 1.

Основные технико-технологические характеристики донной части геофизического комплекса

Наименование	Низкочастотная часть	Высокочастотная часть
Диапазон частот, Гц	3–100	50–2000 и более
Динамический диапазон, дБ	140	140
Количество сейсмоакустических антенн	1–5	1–3
Количество сейсмоакустических модулей в одной антенне	1–50	1–5
Количество пунктов приема в модуле	16, 32, 64	32
Расстояние между пунктами приема в модуле, м	7,5–70	0,37–1,6
Протяженность кабельной линии в антенне, км	1–100	12–50
Глубина установки, м	5–500	5–400
Информационно-вычислительный комплекс (ИВК)	Локальная вычислительная сеть	
Программно-алгоритмическое обеспечение (ПАО)	Реализует алгоритмы СЛОЭ и КБС, построение сейсмоакустических 3D- и 4D-изображений и др.	

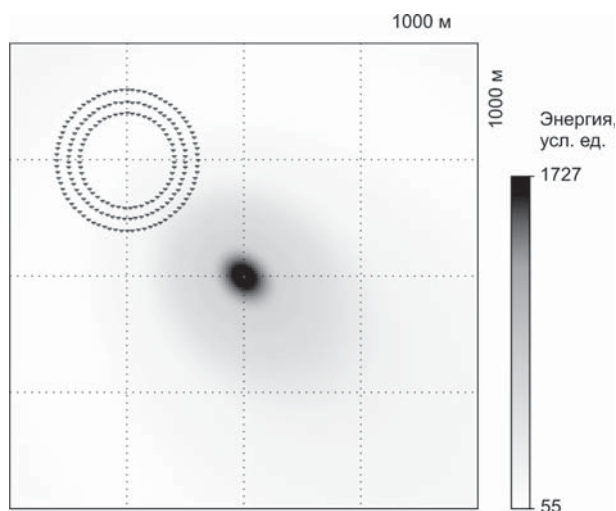


РИС. 2.

Характеристика направленности аперттуры приема в форме тора (три вложенные окружности), рассчитанная для одиночного импульса МСЭ с частотами 30-70 Гц

анализа многочисленных случаев аварийных ситуаций в скважинах (поглощение, фонтанирование с максимальным дебитом, в т. ч. открытое и др.) и характерных особенностей их местонахождения в поле трещиноватости геосреды. Типичные примеры вышеуказанных случаев представлены на рис. 5–7.

Первый пример (рис. 5) демонстрирует достоверность выполненного прогноза поглощения бурового раствора с прихватом инструмента в скважине 30 на Восточно-Песчаной площади (Оренбургская обл.). По результатам изучения открытой трещиноватости геосреды по технологии «Сейсмический локатор бокового обзора» (СЛБО) [3] было установлено, что находящаяся на площади исследования бурящаяся скв. 30 (с текущей глубиной забоя 4600 м и проектной – 5000 м), войдя в зону интенсивной трещиноватости

на глубине 4900 м, может оказаться в аварийной ситуации из-за катастрофического поглощения бурового раствора. Данный прогноз полностью подтвердился через два месяца, когда скважина вошла в эту зону на глубине 4907 м. Поскольку заранее никакие дополнительные мероприятия (по предотвращению поглощения) не проводились, то начались аварийные прихваты инструмента и дальнейшее бурение скважины с целью достижения проектной глубины было остановлено.

Второй пример (рис. 6) демонстрирует целенаправленное бурение скв. 219 (Куюмбинское месторождение, Восточная Сибирь) в субвертикальную зону интенсивной трещиноватости для получения максимального фонтанирующего притока нефти из продуктивной толщи рифейского возраста. При этом не было аварийных ситуаций, т. к. своевременно были выполнены мероприятия по безаварийному бурению в зоне трещиноватости.

Третий пример (рис. 7) соответствует неблагоприятному развитию событий, когда при испытании скв. 30 (Северо-Демьянское месторождение, Западная Сибирь) произошло открытое фонтанирование нефти с дебитом порядка 300 т/сут. Первопричина внезапного выброса заключалась в том, что забой скважины оказался в своде субвертикальной зоны интенсивной трещиноватости, имеющей глубокие корни заложения, и в процессе испытания (при создании депрессии на пласт) эта зона соединилась со скважиной по вновь образованным открытым трещинам, что привело к резкому увеличению давления на забое, значительно превышающему гидростатическое.

Приведенные примеры убедительно показывают, что для своевременного проведения мероприятий с целью предотвращения аварий с катастрофическими последствиями необходима информация о пространственном распределении открытой трещиноватости в геосреде. Длительный мониторинг МСЭ по техноло-

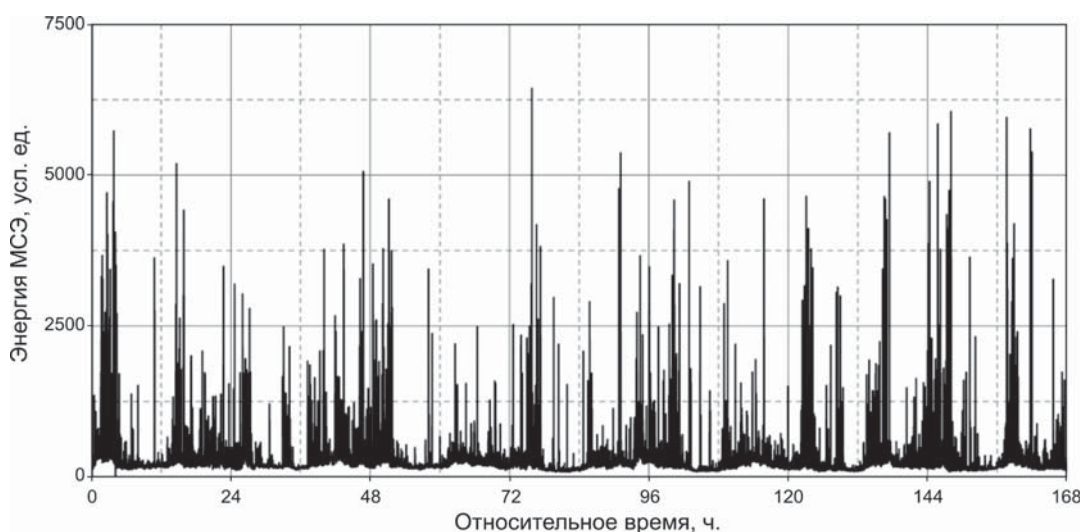


Рис. 3. Временной ряд энергии МСЭ в одной из точек обзора геосреды

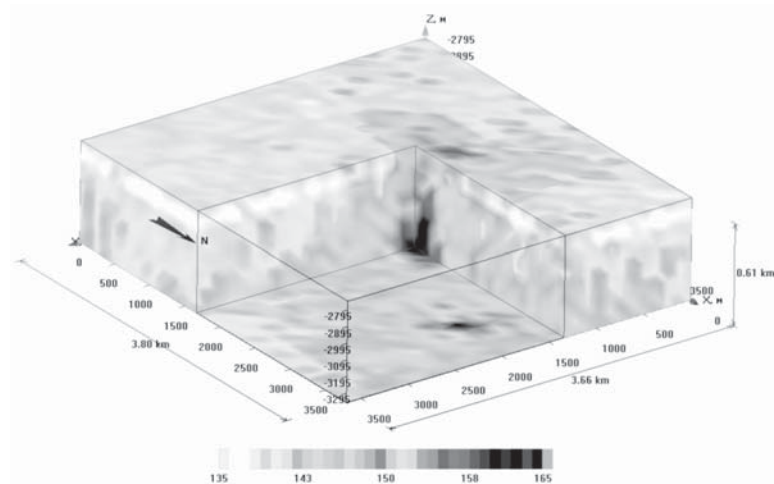


Рис. 4. Пример 3D-поля средней энергии МСЭ (за 48 часов наблюдения)

гии СЛОЭ до и в процессе бурения скважин позволяет получить эту информацию, выделить субвертикальные зоны интенсивной трещиноватости (рис. 4) и контролировать глубину вскрытия этой зоны с целью надежного прогноза и предотвращения аварийных ситуаций в процессе бурения и при испытании скважин.

### 3. ПРОФИЛАКТИКА ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Возникновение техногенного землетрясения связано с ростом аномалии напряженного состояния и, соответственно, зоны аномально высокой открытой

трещиноватости. Однако время разрядки этой зоны и момент возникновения землетрясения предсказать невозможно, что подтверждает мировой опыт человечества от древних времен и по настоящее время. Поэтому решение данной проблемы возможно на основе профилактики землетрясения за счет разрядки очага напряжения – «зародыша» будущего землетрясения, который характеризуется стабильным увеличением размеров и интенсивности зоны аномально высокого напряжения и трещиноватости в течение длительного времени (более года). Именно эти зоны достаточно надежно выделяются по результатам длительного мониторинга МСЭ по технологии СЛОЭ.

Пример реализации контроля пространственно-временного изменения аномальных зон МСЭ представлен на рис. 8. Непрерывный СЛОЭ-мониторинг проводился на одном из месторождений (штат Техас, США) в течение

11 суток. Здесь показаны фрагменты 4D-поля энергии МСЭ в периоды твердотельных лунных приливов и отливов. Данный пример демонстрируют возможность детальной (практически ежесуточной) оценки изменения поля трещиноватости и напряжения.

Разрядка очагов упругого напряжения возможна путем воздействия упругими волнами, например, с помощью сейсмических вибраторов. Эта технология разрядки аномалии открытой трещиноватости для профилактики землетрясений была успешно опробована на Старогрозненском нефтяном месторождении в 1991 г. (рис. 9). Работы проводились по инициативе и под научным руководством Музы Николаевны Смирновой, в то время профессора Грозненского



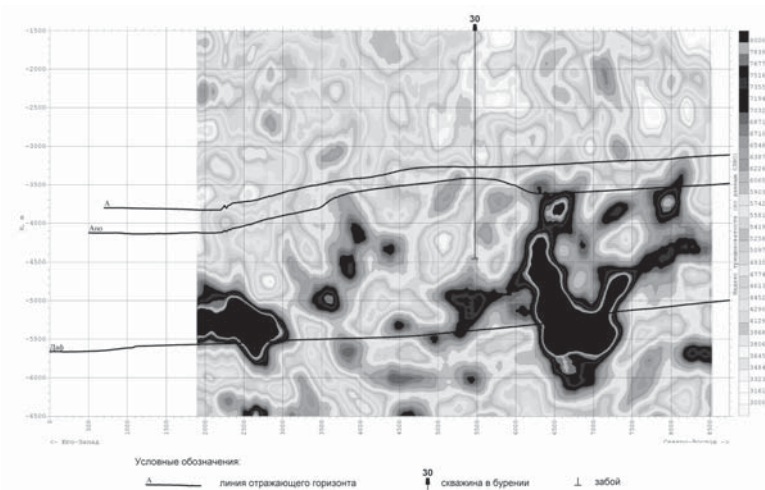


Рис. 5.

Широтный разрез индекса трещиноватости через скв. 30 на Восточно-Песчаной площади, Оренбургская обл.

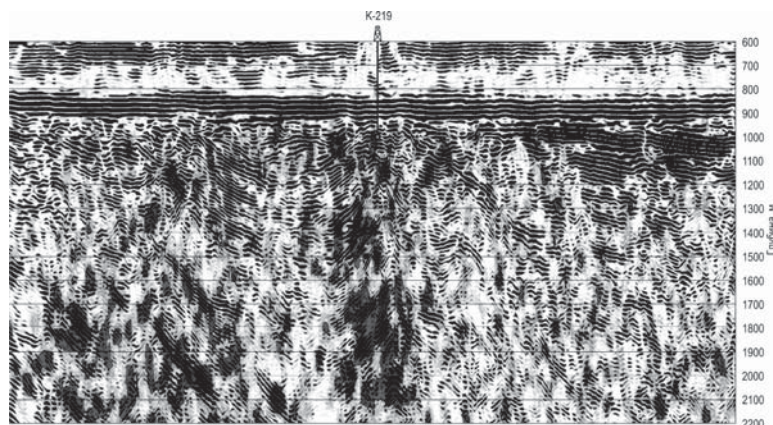


Рис. 6.

Разрез поля трещиноватости (уровни серого) в сопоставлении с разрезом поля отраженных волн (черный) через скв. 219 на Куюмбинском месторождении, Восточная Сибирь

нефтяного института. Активное участие в этих исследованиях принимали И.А. Чиркин, З.С. Воцалевский, С.И. Шлёнкин, Ю.Г. Раевский и др. Эта работа выполнялась в три основных этапа: фоновое изучение трещиноватости геосреды, вибросейсмическое воздействие и повторное изучение трещиноватости. Изучение 3D-поля трещиноватости осуществлялось по технологии СЛБО [2]. Сейсмические наблюдения до и после воздействия были выполнены в идентичных условиях, поскольку схема наблюдения (рис. 9), положение пунктов приема и излучения и технологические параметры излучения, приема и регистрации были неизменными. Воздействие на очаг напряжения с целью его крип-разрядки проводилось с дневной поверхности сейсмическими вибраторами СВ-10/100. Продол-

жительность единичного воздействия (свип-сигнала) составляла 90 с, общее время воздействия – около 12 часов в течение двух суток. Результат обработки материалов СЛБО – поле трещиноватости до и после воздействия, а также их разность («после-до») представлены на разрезе (рис. 10), который ортогонально проходит через субширотный разлом (рис. 9). На разрезе «разности» наглядно отмечается снижение интенсивности локальных аномалий трещиноватости в субвертикальной зоне, что указывает на ее уплотнение и, как следствие, снижает вероятность смещения блоков вдоль субширотного разлома. При этом изменение трещиноватости, наблюдаемое в режиме мониторинга, позволяет надежно контролировать эффективность воздействия на очаг напряжения и оценить степень его крип-разрядки.

**Выводы**

1. Предотвращение на акватории экологических катастроф, возникающих в результате внезапных выбросов нефти из скважин (при их бурении и испытании) или техногенных мелкофокусных землетрясений (при разработке месторождений), возможно за счет:
  - получения и анализа информации о 4D-поле открытой трещиноватости геосреды;
  - выделения субвертикальных зон с аномально интенсивной трещиноватостью;
  - оценки роста размеров и интенсивности этих зон во времени;
  - контролируемой вибросейсмической разрядки очагов аномального напряженного состояния геосреды.
2. Учитывая эффективность технологии СЛОЭ для мониторинга МСЭ и достоверность полученной информации о 4D-поле трещиноватости для решения экологических задач на акваториях, представляется целесообразным включить в комплекс обязательных работ исследования по технологии СЛОЭ на этапах проектирования бурения скважин и в процессе разработки месторождений. В заключение следует отметить, что непрерывный и неограниченный во времени СЛОЭ-мониторинг МСЭ и техно-

И.А. ЧИРКИН, Е.Г. РИЗАНОВ,  
С.В. КАЛЯШИН, С.О. КОЛИГАЕВ, А.А. РАДВАН  
МОНИТОРИНГ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ  
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ  
БЕЗОПАСНОСТИ РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ  
НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА АКВАТОРИИ

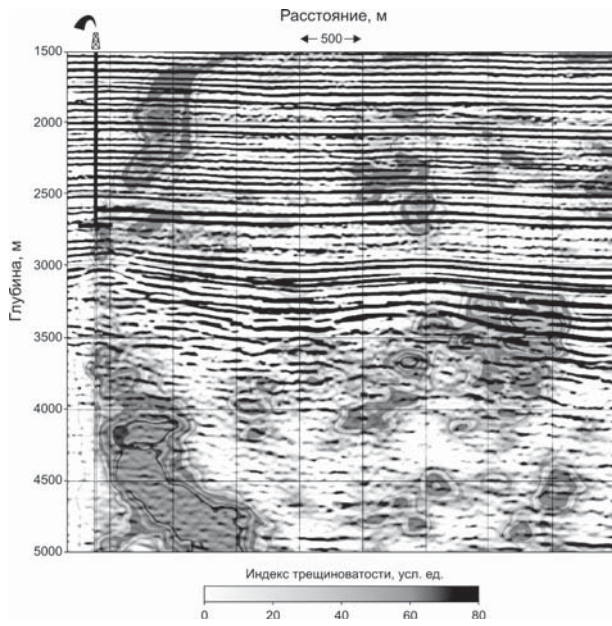


Рис. 7.

Разрез поля трещиноватости в сопоставлении с полем отраженных волн на Северо-Демьянском месторождении, Западная Сибирь

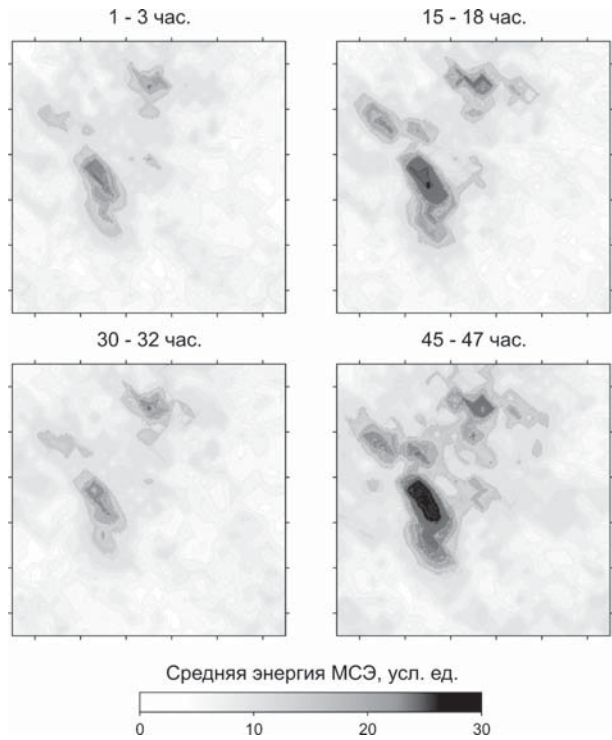


Рис. 8.

Фрагменты 4D-поля энергии МСЭ в периоды лунного прилива (левая колонка) и отлива (правая колонка)

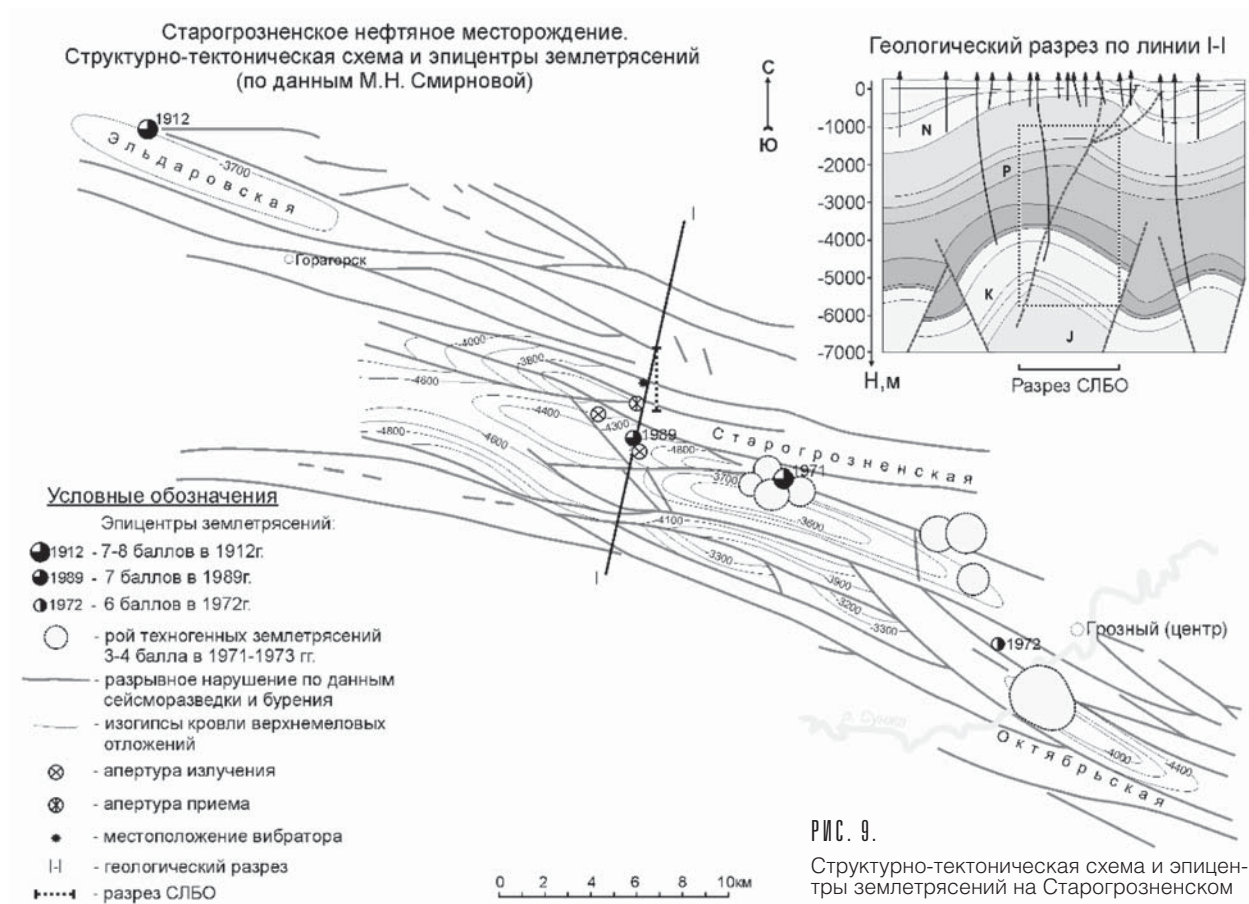


Рис. 9.

Структурно-тектоническая схема и эпицентры землетрясений на Старогрозненском месторождении



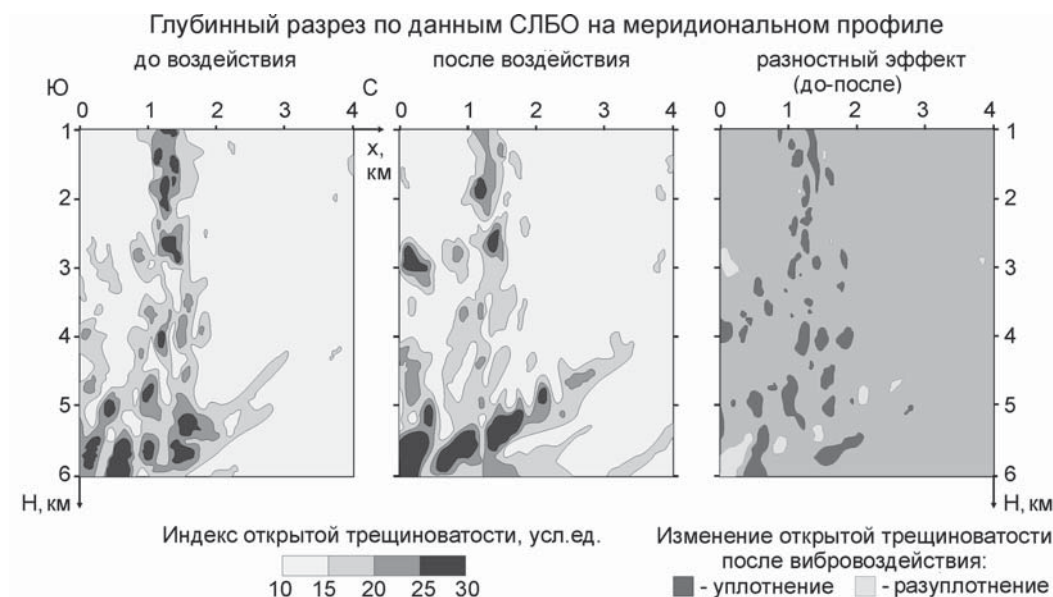


РИС. 10.

Пример разрядки зоны интенсивной трещиноватости на Старогрозненском месторождении

генных шумов в процессе разработки месторождения УВ-сырья позволяет решить широкий спектр задач (геологических, промысловых, технологических, экологических и др.) для увеличения полноты и темпа отбора УВ на месторождении при снижении эксплуатационных затрат и повышении экологической безопасности.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Кузнецов О.А., Чиркин И.А., Курьянов Ю.А., Шлёнкин С.И. и др. Новые технологии и решение прикладных задач. М.: ООО «Центр информационных технологий в природопользовании», 2007. 434 с. (Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред. Т. 3).
  - Кузнецов О.А., Арутюнов С.А., Курьянов Ю.А., Чиркин И.А., Колигаев О.А., Колигаев С.О., Старожук С.А. О применении стационарных донных сейсмоакустических систем в геофизических исследованиях и разработке нефтегазовых месторождений на шельфе // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана», Новосибирск, 2010.
  - О.А. Кузнецов, И.А. Чиркин, Ю.А. Курьянов, Г.В. Рогоцкий, В.П. Дыбленко. Экспериментальные исследования. М.: 2004. 362 с. (Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред. Т. 2).
- Чиркин Игорь Алексеевич, к.г.-м.н., доцент кафедры общей и прикладной геофизики университета «Дубна», главный геофизик ООО «Институт новых нефтегазовых технологий»,  
 ☎ 141982, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, д. 19, 1-306, тел.: +7 (496) 216-61-16, e-mail: iachirkin@gmail.com
- Ризанов Евгений Геннадьевич, геофизик 1 категории, руководитель группы обработки сейсмической информации ООО «Институт новых нефтегазовых технологий»,  
 ☎ 119526, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 146, оф. 201, тел.: +7 (495) 725-60-58
- Каляшин Степан Валерьевич, к.т.н., доцент кафедры общей и прикладной геофизики Университета «Дубна»,  
 ☎ 141982, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, д. 19, 1-306, тел.: +7 (496) 216-61-16, e-mail: stepan@uni-dubna.ru
- Колигаев Сергей Олегович, зав. лабораторией обработки и интерпретации данных геофизических исследований кафедры общей и прикладной геофизики Университета «Дубна»,  
 ☎ 141982, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, д. 19, 1-306, тел.: +7 (496) 216-61-16
- Ахмед Абдельфаттах Радван Абдельхалим, аспирант кафедры общей и прикладной геофизики Университета «Дубна»,  
 ☎ 141982, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, д. 19, 1-306, тел.: +7 (496) 216-61-16