



РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТОЙ ЗОНЫ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЕ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

В. А. Куликов*, Е. А. Хогоев*, А. С. Сальников**, О. М. Сагайдачная**, К. А. Дунаева**,
М. Л. Шемякин***, С. В. Яскевич***

С использованием малоапертурных расстановок в сейсморазведочном диапазоне частот изучена сейсмическая активность эпицентральной области Чуйского землетрясения 2003 г. Показано, что сейсмическая активность территории продуцируется не только афтершоковым процессом, но и более слабыми событиями. Особенность этих событий в том, что координаты их эпицентров сосредоточены непосредственно на площади развития визуально наблюдаемых разрушений, а по глубине эпицентры находятся в пределах залегания самого низкоскоростного слоя в геологическом разрезе и являются источниками низкоскоростных сейсмических волн, несущих доминантные частоты сейсмической эмиссии трещиноватой среды. Выделены основные характеристики сейсмических волн, регистрируемых в таких средах. Сделан вывод, что шумы сейсмической активности зоны трещиноватости – актуальный критерий поиска трещиноватых объектов на Сибирской платформе.

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, микросейсмические события, трещиноватая зона, пассивное наблюдение, Чуйское землетрясение.

STUDIES OF THE CHUYA EARTHQUAKE FRACTURED ZONE AND THEIR APPLICATION TO PETROLEUM GEOLOGY PROBLEM SOLVING ON THE SIBERIAN PLATFORM

V. A. Kulikov, E. A. Khogoev, A. S. Salnikov, O. M. Sagaidachnaya, K. A. Dunaeva,
M. L. Shemyakin, S. V. Yaskovich

Seismic activity in the epicentral area of the 2003 Chuya earthquake has been studied with small-aperture arrays used in the seismic frequency bandwidth. It is shown that seismic activity of the territory is produced not only by aftershock process, but weaker events as well. A peculiarity of these events is that their epicenter coordinates are grouped just over the area of visually observed developing destructions, and in depth the epicenters are within the lowest-velocity layer occurring in the geological section. Besides they are sources of low-velocity seismic waves carrying dominant seismic emission frequencies of a fractured medium. The main features of the seismic waves recorded in such media are distinguished. It is inferred that seismic activity noises in the fractured zone are a relevant search criterion for fractured structures over the Siberian Platform.

Key words: seismic monitoring, microseismic events, fractured zone, passive monitoring, Chuya earthquake.

Сибирская платформа – объект интенсивных геолого-геофизических исследований, направленных на выяснение закономерностей распределения месторождений нефти и газа [3]. Она занимает среднюю часть Северной Азии и является одним из крупных и устойчивых наиболее древних (дорифейских) участков континентальной земной коры. Древний осадочный комплекс платформы отличается разнообразием геологических обстановок и изменчивостью физических свойств горных пород. В его основании залегают преимущественно рифейские и вендкембрийские отложения. В отложениях верхнего венда – нижнего кембрия выделяются два структурных комплекса: нижний подсолевой, включающий терригенно-карбонатные породы, и верхний карбонатно-галогенный. В отложениях подсолевого комплекса прослежен ряд нефтегазовых горизонтов, с которыми свя-

заны основные месторождения региона. Особую роль в строении платформенного чехла играют магматические породы трапповой формации и туфогенные образования.

Исследования открытых в регионе месторождений свидетельствуют о том, что положение залежей нефти и газа контролируется не только структурными формами. В большей степени они определены литологическим составом пород и их коллекторскими свойствами. Амплитуды структур по нижним горизонтам, к которым приурочено большинство открытых залежей, небольшие, картирование их методами сейсморазведки в условиях высокоскоростного разреза затруднено, а иногда даже невозможно из-за ограничений разрешающей способности метода. Значительная часть объектов, подготовленных сейсморазведкой, изначально рассматривалась в основном как антиклинальные структуры. Однако в процессе детализации объектов сейсморазведкой и бурением установлено, как, например, на Верхнечонском

* ИНГГ СО РАН (Новосибирск); ** ФГУП «СНИИГГиМС» (Новосибирск); *** НГУ (Новосибирск)



месторождении, что залежь контролируется, помимо структурного плана, также разломной тектоникой, изменением мощности нижнемотских песчаников и др.

Экспериментально доказано [5, 6, 12], что блочно-иерархическое строение массивов горных пород – фундаментальное свойство геологического разреза (особенно на Сибирской платформе). В процессе тектонической жизни земной коры развивается дифференциация отдельных ее участков, возникают отдельные блоки и ослабленные зоны в областях их сочленений. Крупные блоки, в свою очередь, состоят из нескольких более мелких и внутренней системы ослабленных зон. Частые слабые и редкие сильные землетрясения вместе с медленными движениями земной коры образуют единый глубинный геодинамический процесс.

Методика мониторинга сейсмической (эмиссионной) активности объектов

Наличие в среде источников сейсмического излучения или контрастных неоднородностей приводит к появлению когерентных компонент в шумовом поле, зарегистрированном на поверхности. Используя данные, зафиксированные группой сейсмических датчиков, распределенных на поверхности, можно определить энергию когерентного излучения сферических волн, исходящих из различных точек исследуемой среды, и построить трехмерное распределение источников микросейсмической активности среды (объемное «изображение» сейсмически шумящих объектов).

Пространство под группой сканируется лучом сейсмической антенны в узлах кубической решетки. Обработка сводится к сравнительной оценке энергии сигналов, излучаемых различными точками исследуемого объема среды. В процессе сканирования каждому узлу присваивается некоторый весовой коэффициент, пропорциональный экспериментальной оценке энергии когерентного излучения, исходящего из данной точки. Для оценки энергии сигналов по зарегистрированной сейс-

мограмме рассчитываются интегральные оценки отношения сигнал/помеха для каждого узла сетки опроса.

На основании предложенного подхода был разработан способ сейсмической разведки с использованием мониторинга геологических объектов, проявляющих эмиссионную активность [1, 2, 5, 11]. Для его реализации (опытной апробации) необходимым условием является наличие полигона, характерными чертами которого были бы подобие геологических обстановок, трещиноватость исследуемого геологического массива и помехи техногенного происхождения на площади. В 2003 г. такой полигон был создан самой природой как следствие крупного землетрясения [4], которое до сих пор сопровождается афтершоковым процессом.

Очаг этого сейсмического события располагался в пределах Северо-Чуйского хребта, Чуйской, Курайской межгорных впадин и разделяющего их Чаган-Узунского приподнятого блока (рис. 1а). Землетрясение сопровождалось образованием на поверхности множественных сейсмодислокаций. Очаг его вышел на поверхность в виде протяженной (около 20 км) системы сейсморазрывов. На юго-востоке сейсморазрыв прослеживается в виде протяженного рва шириной около 5 м, который спускается в долину р. Чаган. Разрывы занимают площадь размером 250 м вкрест простирания и 300 м по простиранию. На ней четко выделяются четыре основных разрыва, в основании которых наблюдаются участки провалов земной поверхности на глубину более 3 м (см. рис. 1б).

Факторы, характеризующие динамику процессов микросейсмической активности, изучались по данным активного и пассивного сейсмического мониторинга периферии эпицентральной зоны Чуйского землетрясения [7–9]. Основные сейсмические наблюдения 2004–2010 гг. в зоне главного разрыва проведены с использованием малоапертурных линейных и крестовых расстановок одиночных вертикальных (GS-20DX) и горизонталь-



Рис. 1. Зона системы сейсморазрывов Чуйского землетрясения 2003 г. (а) и трещина, идущая вкрест сейсмического профиля (б)

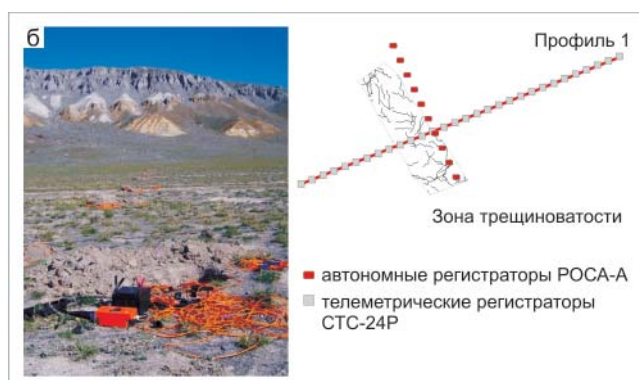
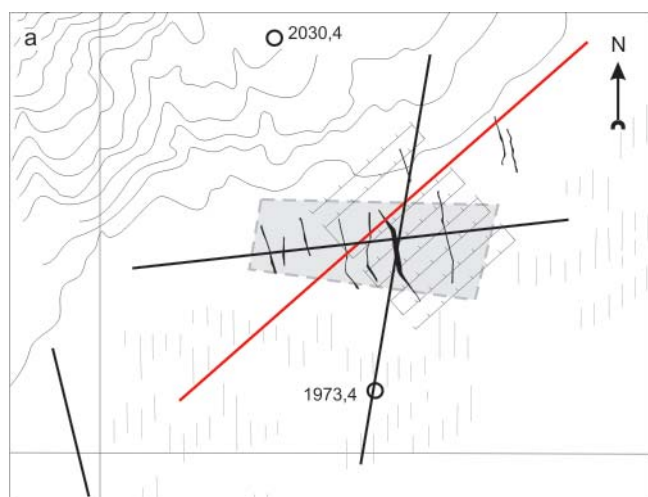


Рис. 2. Обобщенная схема системы наблюдений 2004–2010 гг. (а) и схема наблюдений (2007 г.) с автономными регистраторами POCA-A (б)

ных (GS-20DX-2B) сейсмоприемников с шагом до 15 м. Система профилей располагалась на поверхности таким образом, чтобы перекрыть трещиноватую зону под различными углами, в том числе вдоль (около 300 м) и вкрест простирания трещин (рис. 2). Один профиль был расположен на расстоянии 4,5 км от зоны дислокаций на поверхности блока, где трещины разрыва не выделялись визуально. Наибольшая протяженность профиля, ограниченная горным рельефом, составила 915 м.

Сейсмический процесс регистрировался телеметрической станцией (на 120 рабочих каналов) в режиме реального времени на открытом канале [9]. Регистрация проводилась отдельными сеансами продолжительностью до 3 мин с незначительными (менее 2 мин) перерывами между ними.

Моделирование микросейсмической активности трещиноватой зоны

Для изучения пространственно-временных характеристик микросейсмической активности трещиноватой зоны построена скоростная модель изучаемого участка Чуйской впадины, расположенного в окрестностях с. Бельтир. Опираясь на стратиграфическую колонку и данные бурения, предположили, что сейсмическая активность среды может быть обусловлена нарушениями сплошности, которые появились как следствие сеймотектонических разрывов. Осадочный чехол геологического разреза впадины представлен гравийно-галечниковыми отложениями мощностью 40–50 м; ниже – глинами с прослоями песка и песчаника мощностью до 50 м и глинистыми сланцами вплоть до кровли фундамента. Скоростная модель (см. таблицу) построена на основе данных о величине скоростей V_p по другим регионам и составе пород, условия залегания которых подобны литоразрезу впадины. Данные о скоростях V_s получены пересчетом значений V_p через значения $\gamma = V_p/V_s$.

На основании результатов профильных наблюдений, из которых можно взять пространственное положение отражающих горизонтов, создана приближенная математическая модель упругого

полупространства, содержащего некоторый объем среды с измененными упругими свойствами.

Сейсмическая активность этого объема представлена как действие ограниченного числа источников упругих волн, генерирующих сейсмические волны одной поляризации (продольные). Задача моделирования состояла в том, чтобы получить пространственное распределение интенсивности суммарного сейсмического волнового поля, наблюдаемого на поверхности полупространства. Сравнение вычисленного распределения с полученным на реальных профилях дает возможность судить об адекватности модельных представлений физической сущности микросейсмической активности.

Среда, вмещающая зону неоднородности, представлена в виде однородного полупространства, не содержащего внутренних границ, скорость распространения упругих волн в однородной зоне взята средней по разрезу. Упругие характеристики зоны неоднородности сформированы на 12 % меньше, чем в окружающем полупространстве. Разрывы сплошности в ней моделировались путем проведения границ, которые совпадали с пространственным распределением трещин и стратиграфических границ вертикальной (верхняя) и горизонтальной (нижняя) ориентации. Источники упругих волн размещались в центре каждого блока, образованного соответствующими границами. Математическая задача состояла в расчете траекторий движения сейсмических волн к поверхности

Характеристика скоростной модели разреза

Мощность слоя, м	Литологический разрез	V_p , км/с	V_p/V_s
5	Гравий с суглинистым заполнителем	400–600	0,5
35	Многолетнемерзлые породы	2500	0,4
40	обводненный галечник	3100	0,4
40	песчаник	2000	0,3
	Глины плотные с включениями гравия		
100	Обводненные глинистые трещиноватые сланцы	3400	0,4
>10000	Кристаллический фундамент	>4000	0,55

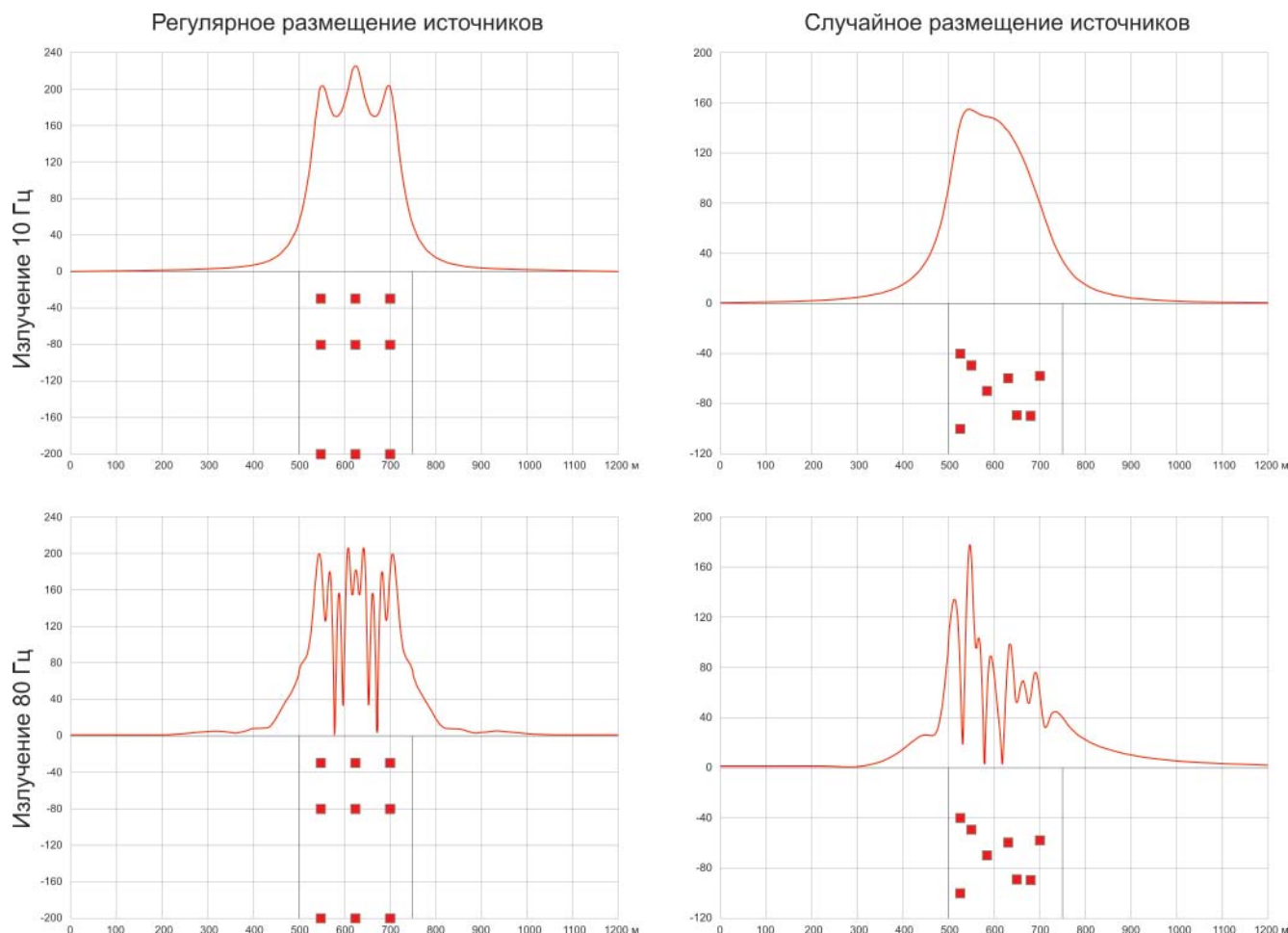


Рис. 3. Графики энергии волнового поля от источников излучения, распределенных внутри зоны трещиноватости

в зависимости от положения каждого источника в зоне неоднородности и последующего суммирования интенсивностей сейсмических колебаний с учетом фазовых сдвигов, приобретаемых за счет увеличения траекторий от верхнего к нижнему распределению источников.

Результаты расчетов в виде зависимостей функций интенсивности суммарного волнового поля от координат положения датчиков на поверхности земли приведены на рис. 3.

Как видно из приведенных данных, основная энергия сейсмического волнового поля концентрируется в непосредственной окрестности от границ зоны трещиноватости, особенно в низкочастотном диапазоне излучения. Уровень интенсивности сейсмической записи отчетливо соотносится с внешними границами сейсмодислокаций. Случайное распределение источников указывает на смещение максимума интенсивности волнового поля в сторону большего количества излучателей относительно этих границ.

Анализ волновых сейсмических полей

Анализ кинематических и динамических параметров обобщенных волновых полей выполнен по сейсмограммам в целом и по одиночным волновым импульсам, полученным при сейсмическом мониторинге с активным источником, а так-

же по интервалам записи, пространственно приуроченным к консолидированным и разрушенным участкам профилей. При исследовании амплитудно-частотных спектров сейсмических записей отчетливо проявился эффект «проседания» спектральной плотности энергии сигналов: при прохождении сигнала через зону разрушений происходит поглощение высокочастотной составляющей сигнала (рис. 4). Изучение закономерностей пространственно-временного распределения микросейсмической активности приводит к тем же результатам, что и изучение динамики сейсмической записи полного волнового поля (рис. 5).

Среди динамических параметров сейсмических сигналов отметим следующие.

- Наиболее устойчивым параметром, характеризующим динамику процесса сейсмической эмиссии, являются амплитудно-частотные характеристики микросейсмических событий.

- Наблюдается пониженное (в 1,7 раза) значение преобладающих частот в спектре сейсмических сигналов над трещиноватой зоной.

- Область прослеживания снижения преобладающих частот спектра сейсмических сигналов превышает зону развития трещиноватости примерно на 80 м, что соответствует по порядку длине упругой отраженной продольной волны.

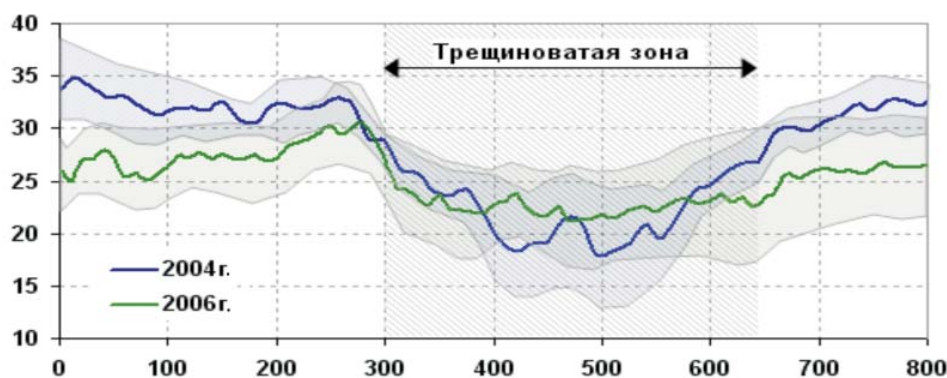


Рис. 4. Графики преобладающей частоты зарегистрированного сейсмического поля в трещиноватой зоне

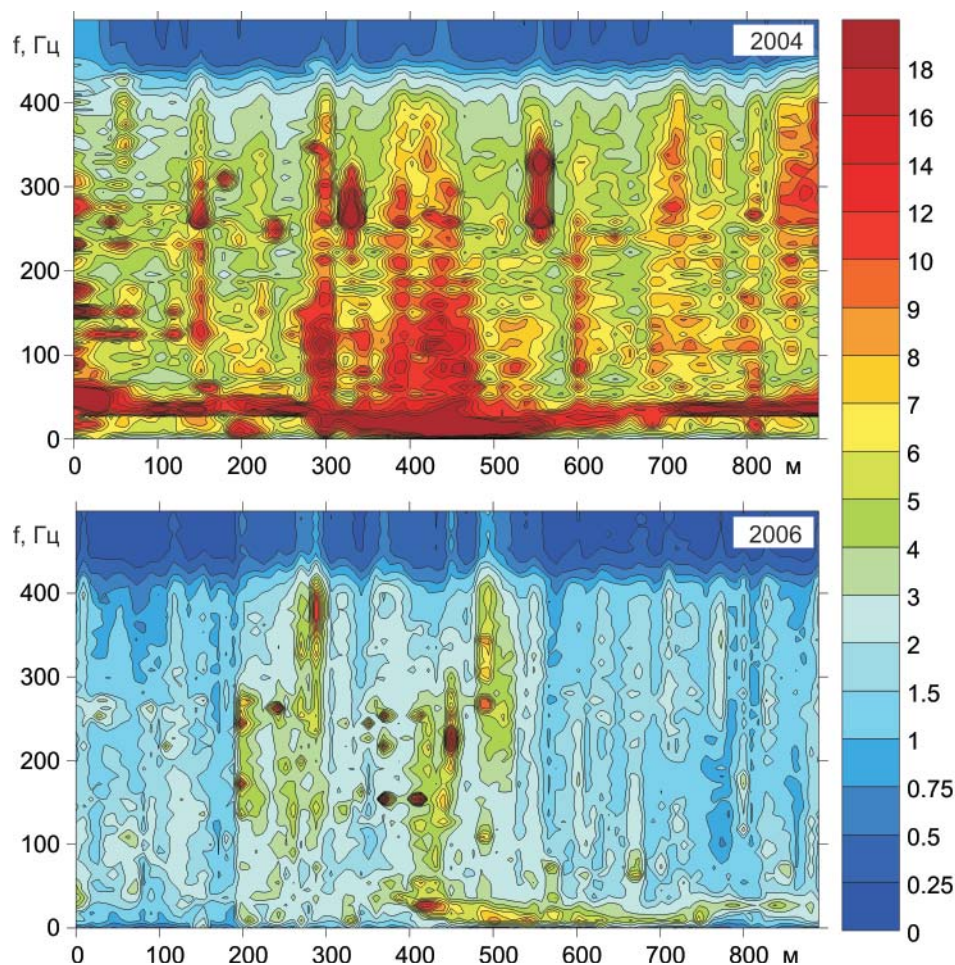


Рис. 5. Плотность (цветовая шкала) распределения энергии сейсмических шумов по частотам и пространственным координатам

- Шумы сейсмической активности энергетически наиболее выражены в пределах зоны трещиноватости.

- Частотный диапазон шумов сейсмической активности занимает область частот от 10 до 80 Гц.

Параметрическая модель трещиноватого коллектора

По результатам изучения шумов сейсмической активности трещиноватой зоны Чуйского землетрясения составлена параметрическая модель трещиноватого коллектора для Сибирской платформы. Теоретической основой для этого послужило предположение о блоковой иерархически построенной системе элементов геологического разреза, включающих залежь углеводо-

родов. В этих условиях сейсмическое волновое поле, формирующееся при падении упругих волн на блочную структуру, состоит из отраженных, дифрагированных и рассеянных волн, а также тех, которые изменили поляризацию и на сейсмограммах выделяются в виде непротяженных элементов (отражателей).

Поскольку размеры блоков имеют некоторое распределение, то поглощаются сразу несколько спектральных составляющих, и в результате амплитудно-частотная характеристика изменяется: деформируется из непрерывной и гладкой в разрывную. При этом каждый элемент блочной структуры излучает поглощенную энергию упругих волн как отдельный источник колебаний сейсмического диапазона частот. Упругие волны от глубинных источни-



ков достигают земной поверхности через верхнюю часть разреза, которую пересекают всего один раз. Поскольку размеры данных блоков различны, то на сейсмических записях они наблюдаются за пределами интервала регистрации отраженных волн как сейсмические помехи (квазиволны).

Принимая эту геодинамическую модель объекта за основу, в соответствии с теорией суперпозиции отдельных независимых друг от друга колебаний определяем, что для таких систем синфазное суммирование колебаний возможно только в областях наименьших различий между частотами и фазами отдельных слагаемых.

Особо отметим, что метод сейсморазведки ОГТ способствует аккумуляции энергии, переносимой упругими волнами от искусственных источников, особенно импульсных, в спектре которых содержится достаточно широкий набор гармонических частот. Если профиль ОГТ пересекает зону, расположенную в пределах трещиноватого объекта, то можно наряду с низкими частотами выделить и более высокие.

Отличительная черта таких моделей – многовариантность их построения без привлечения

предположений о непрерывности и протяженности горизонтальных и субгоризонтальных границ. С другой стороны, физическое моделирование показывает, что каждый такой блок иерархической системы можно представить одновременно в двух позициях (ролях).

Первая из них проявляется в виде фраунгоферовского процесса, когда блок поглощает именно ту часть энергетического спектра упругих колебаний, которая содержится в спектре собственных колебаний блока. Поскольку размеры блоков имеют некоторое распределение, то поглощаются сразу несколько спектральных составляющих.

Вторая роль заключается в том, что каждый элемент блочной структуры излучает поглощенную энергию упругих волн, как отдельный источник колебаний сейсмического диапазона частот. Амплитуда этого излучения мала и не превышает уровень помех. Частоты волнового процесса занимают ту полосу спектра, которая определяется свойствами геологических пород разреза, покрывающих залежь. Упругие волны от данных глубинных источников достигают земной поверхности,

проходя верхнюю часть разреза всего один раз. По этой причине преобладающие частоты этих глубинных волн сдвинуты в высокую часть спектра по сравнению с частотами отраженных волн. Сдвиг амплитудно-частотных характеристик восходящих глубинных волн содержит целый интервал частот, продуцируемых отдельными фрагментированными блоковыми телами, границами которых являются трещины в породах коллектора.

Расстановка сейсмоприемников производит селекцию колебаний в низкочастотной области спектра, если профиль расположен вне проекции границ зоны трещиноватости на дневную поверхность. Если профиль пересекает эту зону, то сейсмоприемники, расположенные в пределах трещиноватого объекта, позволяют выделить и более высокочастотную часть колебаний. Следовательно, частотный диапазон сейсмических колебаний будет занимать область от 4–5 Гц (низкие) до 25–40 Гц и более (высокие).

Предполагая, что представление об иерархическом блочном строении геологического массива правильное, можно создать обобщенную физическую модель нефтегазового коллек-

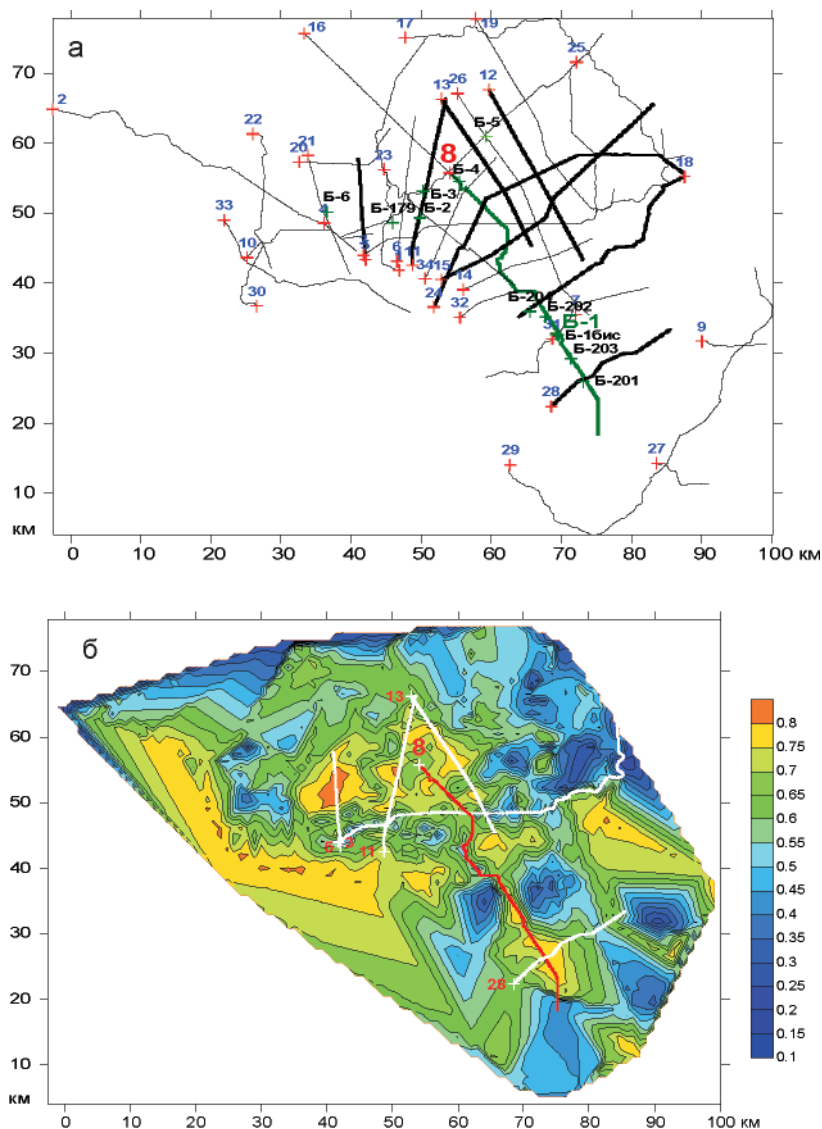


Рис. 6. Схема размещения профилей на Берямбинской площади (а) и карта аномалий энергии (удельной) шумов сейсмической активности на площади в диапазоне частот 10–40 Гц (б)



тора, учитывающую его геологическое строение и основные свойства пород. Наибольшая трещиноватость (основная характеристика коллектора) приурочена к деформированным зонам пород коллектора и к участкам, охваченным дизъюнктивной дислокацией. Трещиноватость коллекторов может быть тектонического или диагенетического происхождения.

В связи с этим эффекты понижения частот и концентрации энергии шумов сейсмической активности использовались для обнаружения трещиноватых зон по материалам сейсморазведки 2D (МОВ-ОГТ) на перспективных площадях Сибирской платформы. В качестве примера приведем обработку архивных материалов сейсморазведки по Берямбинской площади (рис. 6, 7). Зелеными крестиками отмечено положение скважин.

Как видно из приведенных материалов обработки, на площади выделяется пять перспективных участков, где плотность удельной средней энергии в аномалиях более 0,75 от полной энергии в интервале частот от 0 до 250 Гц. На рис. 6б белым выделено шесть профилей, по которым проводилось сравнение положения аномалий шумов сейсмической активности со структурным планом в виде временных разрезов. На рис. 7 показано, что узкая полоса аномалии, протянувшаяся от профиля № 7, где расположена продуктивная на газ скв. Б-1, до профиля № 28, практически совпадает с антиклинальной структурой временного разреза.

Для выделения и построения аномалий удельных энергий шумов сейсмической активности был разработан программный комплекс «Sam-

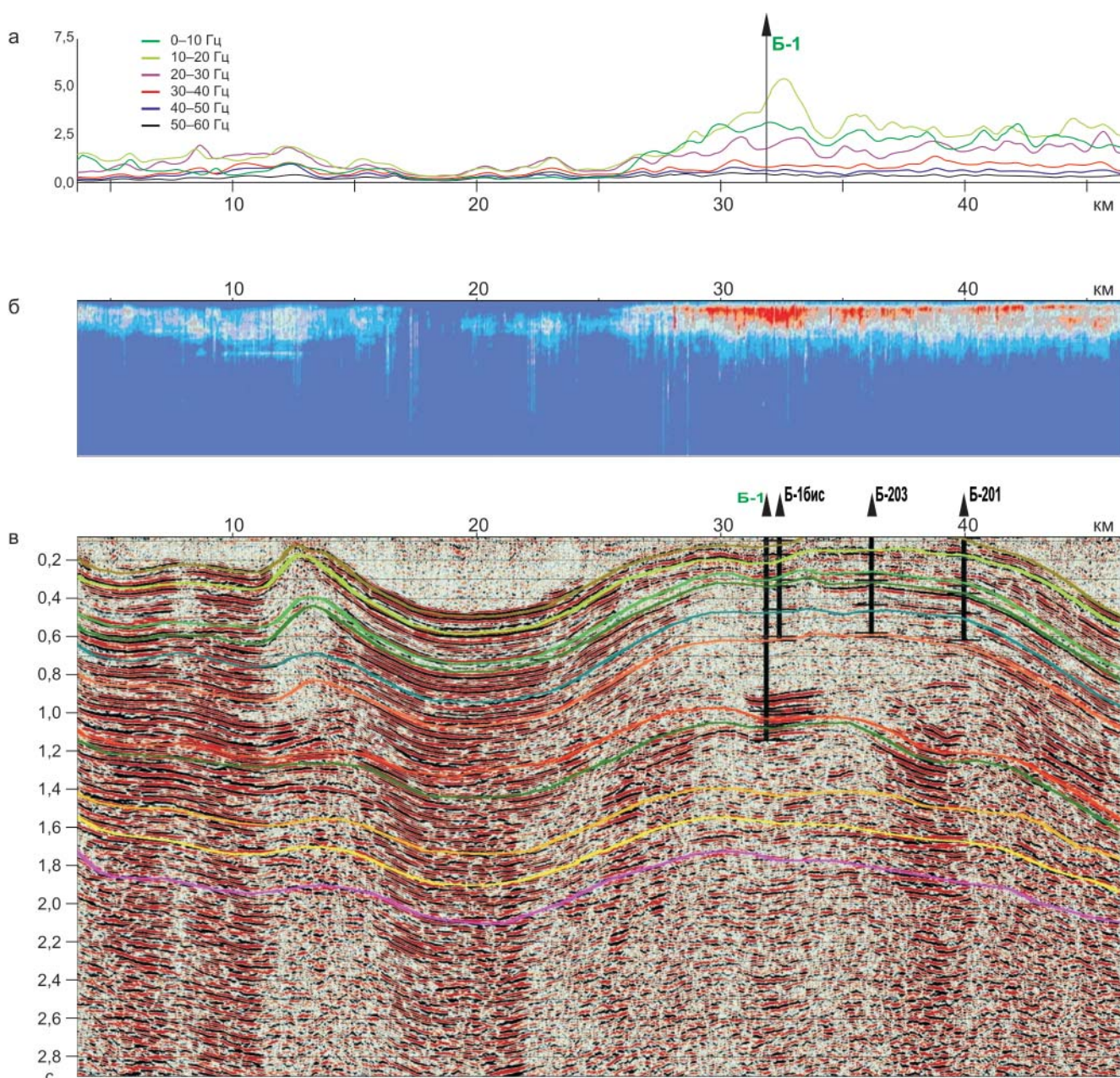


Рис. 7. Сейсмический профиль 8: а – графики удельных интервальных спектров; б – положение аномалии в координатах профиля; в – разрез 2D



Mcs» в среде программирования C++Builder под операционными системами семейства Windows [10, 11]. Входными данными служат первичные сейсмограммы, полученные при работах МОВ-ОГТ (формат данных SEG-Y). Необходимое условие – наличие в заголовках трасс данных о геометрии системы наблюдений (площадных координатах группы приема и точки взрыва, удалении). Спектры рассчитываются по участкам трасс в заданном временном окне в зависимости от удаления. Суммируются спектры только тех трасс, координаты пункта приема которых отличаются менее чем на шаг ОГТ от текущей точки ОГТ. Для исключения трасс, содержащих импульсные помехи большой амплитуды, данные подвергаются фильтрации по величине среднеквадратической амплитуды.

Выводы

Основной результат проведенных исследований сейсмической активности – выделение определяющих признаков трещиноватых зон:

- амплитудно-частотные характеристики микросейсмических событий;
- границы снижения частот спектра сейсмических сигналов, большие зоны развития трещиноватости на длину упругой отраженной продольной волны;
- наибольшая энергетическая выраженность шумов сейсмической активности в пределах зоны трещиноватости, что по профилям наблюдений выделяется в качестве аномально высоких значений усредненных амплитудно-частотных характеристик по сейсмоприемникам, находящимся в трещиноватой зоне;
- частотный интервал шумов сейсмической активности 0–250 Гц.

Обработка архивных материалов сейсморазведки МОВ-ОГТ в пакете «Sam-Mcs» показала, что признаки трещиноватых зон, выделенные по экспериментальным наблюдениям шумов сейсмической активности, позволяют строить распределения аномалий удельной энергии, которые удовлетворительно совпадают со структурным планом, построенным по результатам сейсмических наблюдений. В целом, признаки сейсмической активности являются дополнительным косвенным подтверждением наличия трещиноватых зон на исследуемой площади.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ведерников, Г. В.** Опыты по регистрации геодинамических шумов от нефтегазовых залежей [Текст] / Г. В. Ведерников, А. В. Жарков,

Л. А. Максимов // Геофизика. – 2001. – Спец. выпуск «30 лет ОАО „Сибнефтегеофизика“». – С. 96–98.

2. **Ведерников, Г. В.** Новые возможности изучения геодинамических шумов от нефтегазовых скважин [Текст] / Г. В. Ведерников // Геофизика. – 2006. – № 5. – С. 9–12.

3. **Геология** нефти и газа Сибирской платформы [Текст] / Под ред. А. Э. Конторовича, В. С. Суркова, А. А. Трофимука. – М.: Недра, 1981. – 552 с.

4. **Гольдин, С. В.** Чуйское землетрясение и его афтершоки [Текст] / С. В. Гольдин, В. С. Селезнев, А. Ф. Еманов // Докл. РАН. – 2004. – Т. 395, № 4. – С. 534–536.

5. **Николаев, А. В.** Развитие физических основ новых методов сейсмической разведки [Текст] / А. В. Николаев // Вестн. АН СССР. – 1985. – № 3. – С. 18–27.

6. **Николаев, А. В.** Изучение литосферы Земли сейсмическим шумом [Текст] / А. В. Николаев, П. А. Троицкий, И. Я. Чеботарева // Докл. АН СССР. – 1986. – Т. 286, № 3. – С. 586–591.

7. **Сейсмическая** и электрическая анизотропия как индикатор напряженного состояния трещиноватого массива горных пород [Текст] / Ю. А. Дашевский, В. А. Куликов, Б. Е. Моисеев [и др.] // Физические проблемы поиска и разведки полезных ископаемых. – 2006. – № 6. – С. 31–46.

8. **Сейсмический** мониторинг геологической среды в условиях поверхностно выраженных сейсмодислокаций (результаты изучения анизотропных сред) [Текст] / В. А. Куликов, Б. Е. Моисеев, Т. В. Нефедкина [и др.] // Сб. матер. Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь – 2007». Т. 5. – Новосибирск: СГГА, 2007. – С. 165–169.

9. **Технология** и результаты исследований сейсмического шума в зоне главного разрыва разрушительного Чуйского землетрясения 2003 г. [Текст] / В. А. Куликов, О. М. Сагайдачная, К. А. Дунаева [и др.] // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2008. – № 2. – С. 26–32.

10. **Хогоев, Е. А.** Свидетельство Государственной регистрации программы для ЭВМ «Sam-Mcs» № 2008613961 от 19.08.2008.

11. **Хогоев, Е. А.** Технология изучения геодинамических шумов нефтегазовых залежей [Текст] / Е. А. Хогоев // Сб. докл. науч.-практ. конф. «Сейсмические исследования земной коры». – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2009. – С. 232–238.

12. **Чеботарева, И. Я.** Исследование источников сейсмической эмиссии в земной коре (Япония, Северный Канто) [Текст] / И. Я. Чеботарева, А. В. Николаев, Х. Сато // Докл. РАН. – 1997. – Т. 357, № 4. – С. 542–546.

© В. А. Куликов, Е. А. Хогоев, А. С. Сальников,
О. М. Сагайдачная, К. А. Дунаева,
М. Л. Шемякин, С. В. Яскевич, 2011