

УДК 550.344.094.8

О.Л. Кузнецов¹, В.Г. Гайнанов², А.А. Радван³, И.А. Чиркин⁴, Е.Г. Ризанов⁵,
С.О. Колигаев⁶

ПРИМЕНЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАССЕЯННЫХ И ЭМИССИОННЫХ ВОЛН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Успешность бурения скважин на нефть и газ во многом определяется наличием высокого содержания углеводородов и проницаемостью коллектора в месте его вскрытия. Для достоверного изучения этих характеристик необходимо использовать волны микросейсмической эмиссии и рассеянного отражения. Для их наблюдения, выделения и позиционирования в геосреде разработаны технологии «сейсмолокация очагов эмиссии» и «сейсмический локатор бокового обзора», которые существенно расширяют спектр задач, решаемых сейсморазведкой при освоении месторождений углеводородов. Приведены примеры применения этих технологий при разведке и разработке месторождений УВ.

Ключевые слова: месторождение нефти и газа, сейсморазведка, рассеянные волны, эмиссионные волны, трещиноватость, технологии.

The success of drilling oil and gas wells is largely determined by the presence of high HC-content and permeability of the reservoir at the point of penetration. For a reliable study of these characteristics should be used microseismic emission and the scattered reflection waves. For their observation, selection and positioning in geomedium we developed technology “Seismic Location of Emission Centers” and “Side-View Seismic Location”, which significantly extend the range of problems solved during seismic exploration of hydrocarbon deposits. Examples of application of these technologies in the exploration and development of hydrocarbon deposits are provided.

Key words: oil and gas field, seismic exploration, scattered waves, emission waves, fractures, technology.

Введение. Успешность бурения глубоких скважин (с получением рентабельного притока нефти и/или газа) на месторождениях углеводородов (УВ) составляет при поиске ~30%, при разведке ~70% и при разработке ~95% [Тимурзиев, 2010]. При этом в процессе разработки обычно 85–90% общей добычи УВ приходится на 10–15% скважин. Успешность бурения и добычи обусловлена расположением скважин на участках с высокими насыщением УВ и проницаемостью коллектора. Изучение этих свойств коллектора особо актуально, так как информация о них позволяет существенно снизить капитальные затраты на освоение месторождений (за счет заложения глубоких скважин в «удачных» местах) и значительно повысить эффективность их разработки.

Сейсморазведка — наиболее информативный геофизический метод изучения геологической

среды, но для достоверного решения указанных задач целесообразно расширить ее информационную базу за счет использования волн других классов, имеющих доминантную зависимость от проницаемости и УВ-насыщения геосреды, поскольку отраженные волны (ОВ) не имеют такой зависимости.

Сейсмические методы изучения трещиноватости и УВ-насыщения горных пород. Надежный индикатор открытой трещиноватости (проницаемости) геосреды — *сейсмические рассеянные волны* (РВ), которые образуются в геологической среде повсеместно при отражении от неоднородностей с размерами (l) меньше ($l \leq \lambda$) и значительно меньше ($l \ll \lambda$) длины волны (λ) [Кузнецов и др., 2004]. Самой жесткой (в акустическом отношении) неоднородностью в геологической среде являются открытые трещины. На их совокупности (в преде-

¹ Государственный университет «Дубна», президент; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизики, профессор, докт. техн. н.; *e-mail:* olk@uni-dubna.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, докт. техн. н.; *e-mail:* vgain@hotmail.ru

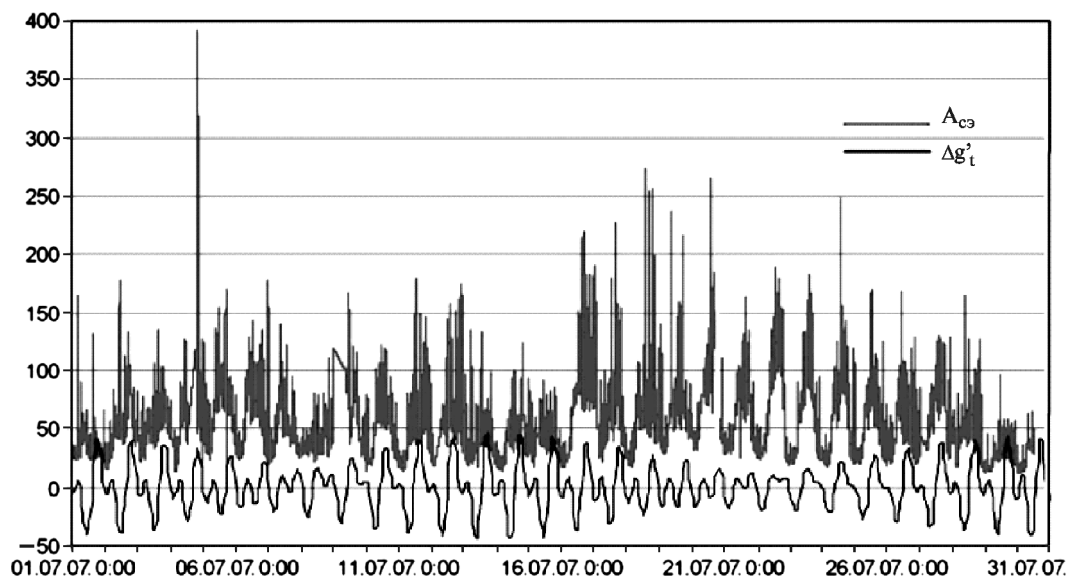
³ Государственный университет «Дубна», кафедра общей и прикладной геофизики, аспирант; *e-mail:* aaradwan2@gmail.com

⁴ Государственный университет «Дубна», кафедра общей и прикладной геофизики, доцент, канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* iachirkin@gmail.com

⁵ Государственный университет «Дубна», кафедра общей и прикладной геофизики, геофизик 1-й категории; *e-mail:* egrizanov@gmail.com

⁶ Государственный университет «Дубна», кафедра общей и прикладной геофизики, зав. лабораторией обработки и интерпретации данных геофизических исследований; *e-mail:* Dex@mail.ru

Рис. 1. Пример натурального измерения энергии МСЭ (усл. ед., $A_{сэ}$) в сопоставлении с временным градиентом изменения силы тяжести в месте измерения ($\Delta g'_t$) в течение 30 сут.



лах 1-й зоны Френеля) образуются сейсмические РВ, интенсивность которых на порядок выше, чем при отражении от закрытых трещин, физических и геометрических шероховатостей и т.п. в геосреде. Поэтому энергия РВ доминантно соответствует трещинной пористости геосреды.

Наиболее надежную информацию о типе флюидонасыщения и неравномерности УВ-содержания в породах-коллекторах можно получить, используя волны микросейсмической эмиссии (МСЭ), которые возникают в результате преобразования упругой энергии из потенциальной формы (упругое напряжение на концах открытой трещины) в кинетическую (упругая волна акустического диапазона). Этот процесс экспериментально изучен М.В. Гзовским на полупрозрачных моделях и подробно описан в работе [Гзовский, 1975]. Волны МСЭ имеют следующие свойства:

- образуются в процессе кооперативного излучения (типа цепной реакции) упругих волн от совокупности открытых трещин в пределах 1-й зоны Френеля;

- возникают в геосреде повсеместно, постоянно и непрерывно;

- формируют в каждой «точке» (с размерами зоны Френеля) случайный мультипликативный процесс эмиссии упругой энергии (рис. 1, $A_{сэ}$);

- стационарные характеристики этого процесса (среднее значение, дисперсия и автокорреляционная функция) доминантно зависят от геологических характеристик (тип флюидонасыщения, напряженное состояние и прочностные свойства пород) [Кузнецов и др., 2007].

Мониторинг волн МСЭ (в режиме непрерывного наблюдения) выполняют в течение 20–30 сут., учитывая влияние твердотельных лунно-солнечных приливов на мультипликативность случайного процесса (рис. 1).

Рассеянные волны и волны МСЭ существенно отличаются от ОВ по амплитуде (на 1–3 порядка меньше), годографу (точечный излучатель) и ме-

сту возникновения (повсеместно). Поэтому для их наблюдения, выделения и позиционирования применяют различные способы и технологии [Арутюнов и др., 1997; Ведерников и др., 2011; Кузнецов и др., 2007; Sheriff et al., 1995]. Наиболее эффективными в геологическом отношении следует считать технологии «сейсмический локатор бокового обзора» (СЛБО) и «сейсмолокация очагов эмиссии» (СЛОЭ). В этих технологиях, разработанных учеными и специалистами научной школы нефтегазовой сейсмоакустики проф. О.Л. Кузнецова [Кузнецов и др., 2004, 2007], реализован принцип локаторов активного и пассивного типов (рис. 2), которые за счет суперкратного (более 10^4) накопления позволяют выделить микросейсмические волны (рассеянные и естественной эмиссии) и позиционируют их, используя процедуру сканирующего фокусирующего обзора нижнего полупространства.

В технологии СЛБО используют площадные антенны излучения и приема сейсмических волн (рис. 2,а), а для исключения или существенного снижения влияния ОВ на РВ используют боковой обзор, когда точки сканирования задают за пределами зон формирования ОВ. Изучение пространственного распределения открытой трещиноватости по технологии СЛБО возможно как по самостоятельным наблюдениям локатора, так и на основе переобработки исходных полевых материалов МОГТ-2D или -3D. Для изучения пространственно-временного (4D) изменения трещиноватости в результате техногенного воздействия на геосреду (например, при гидроразрыве пласта, искусственном заводнении и др.) наблюдения СЛБО выполняют в режиме мониторинга до и после воздействия.

В технологии СЛОЭ используют только приемные антенны (рис. 2,б) с размерами, как и в СЛБО, около 1–2 км в диаметре. По технологии СЛОЭ исследования выполняют в двух основных режимах — оперативном и долговременном. В первом

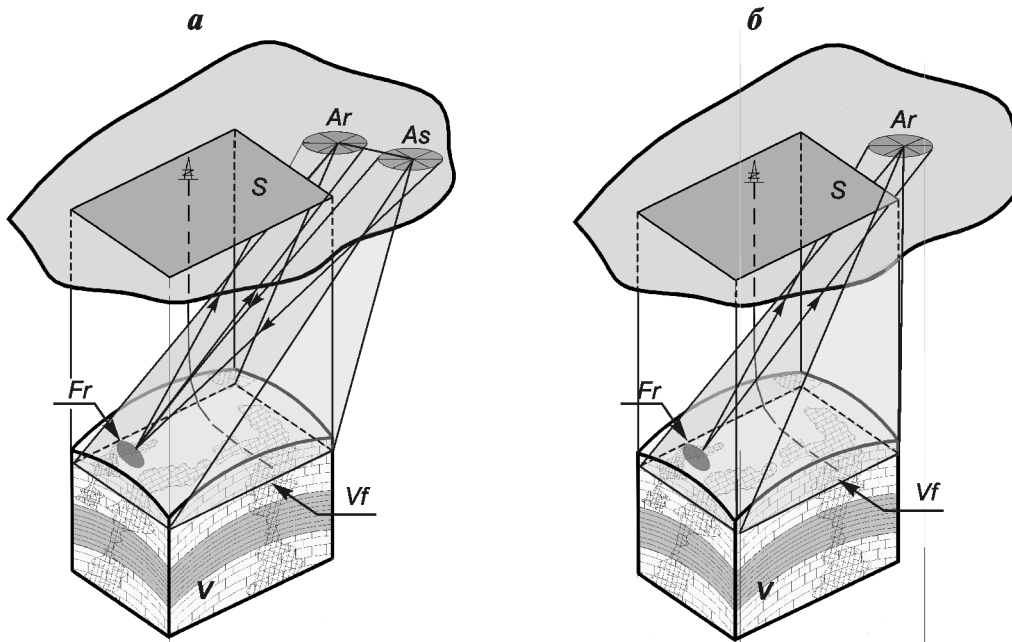


Рис. 2. Принципиальные схемы наблюдений активным локатором — методом СЛБО (а) и пассивным локатором — методом СЛОЭ (б). *Ar* и *As* — апертуры приема и излучения сейсмических волн соответственно, *S* — изучаемая площадь, *V* — изучаемый объем, *Vf* — зона трещиноватости, *Fr* — 1-я зона Френеля $(\lambda s)^{0,5}$

случае определяют динамику и пространственное положение процесса трещинообразования в реальном времени, что необходимо для оперативного контроля за различными техногенными воздействиями в геосреде (гидроразрыв, бурение, перфорация и др.). При долговременном режиме определяют различные характеристики геосреды и их изменение, в том числе в залежи УВ, для решения широкого спектра геологических, технологических, экологических и других задач [Кузнецов и др., 2007; Kuznetsov et al., 2016a]. К числу наиболее важных задач можно отнести:

- определение структуры неоднородности и неравномерности флюидонасыщения;
- определение конфигурации фронта вытеснения нефти водой;
- выделение субвертикальных зон интенсивной открытой трещиноватости, осуществляющих подпитку месторождения флюидом и энергией (теплом и давлением);
- выделение участков высокого нефтесодержания в обводненной части залежи (так называемых останцов) и на сопряженной территории для прироста запасов;
- определение латеральной структуры основных флюидных потоков (воды и нефти) в залежи для оптимизации схем и режимов искусственного заводнения залежи;
- выбор первоочередных скважин для проведения в них геолого-технологических мероприятий с целью кратного увеличения притока УВ в скважину;
- контроль в реальном времени за процессом бурения скважины для выбора оптимальных режимов бурения, прогноза аварийных ситуаций и др.;
- контроль в реальном времени за техногенными воздействиями на пласт (гидроразрыв, закачка воды и газа, перфорация и др.);

— локация очагов аномального напряжения геосреды — «зародышей» будущих техногенных землетрясений и контроль за их разрядкой (профилактика) и др.

Этот далеко не полный перечень реально решаемых задач показывает исключительно высокую перспективность использования СЛОЭ-мониторинга.

Примеры применения технологий СЛБО и СЛОЭ. *Комплексирование сейсмических технологий* [Meltchouk et al., 2007] на основе применения волн разного класса (отраженных, рассеянных и эмиссионных) позволяет не только существенно расширить спектр решаемых задач, но и значительно повысить надежность рекомендаций на постановку бурения поисково-разведочных скважин. Показательный пример — разведка Куюмбинского месторождения УВ (Восточная Сибирь, Красноярский край) с площадью около 6 тыс. км² в рифей-вендской осадочной толще [Mukhamedzyanov et al., 2005]. Здесь до применения СЛБО успешность бурения разведочных скважин по результатам МОГТ-2D и -3D составляла около 40%, средний дебит — около 30 т и максимальный — около 120 т нефти/сут. Использование информации об открытой трещиноватости позволило получать высокие и максимально возможные притоки нефти (~400–700 т нефти/сут) во всех вновь пробуренных скважинах, что оптимизировало разведку Куюмбинского месторождения с экономическим эффектом более 4,3 млрд руб.

Аналогичный пример — разведка Аюбинского газового месторождения (Предуральский прогиб, Оренбургская область) [Kuznetsov et al., 2016b], где для определения оптимального места бурения разведочной скважины № 172 (рис. 3,а) использована информация об ОВ (свод структуры), РВ (аномалия трещиноватости) и МСЭ (наличие газа). Кроме того, при выборе места заложения этой

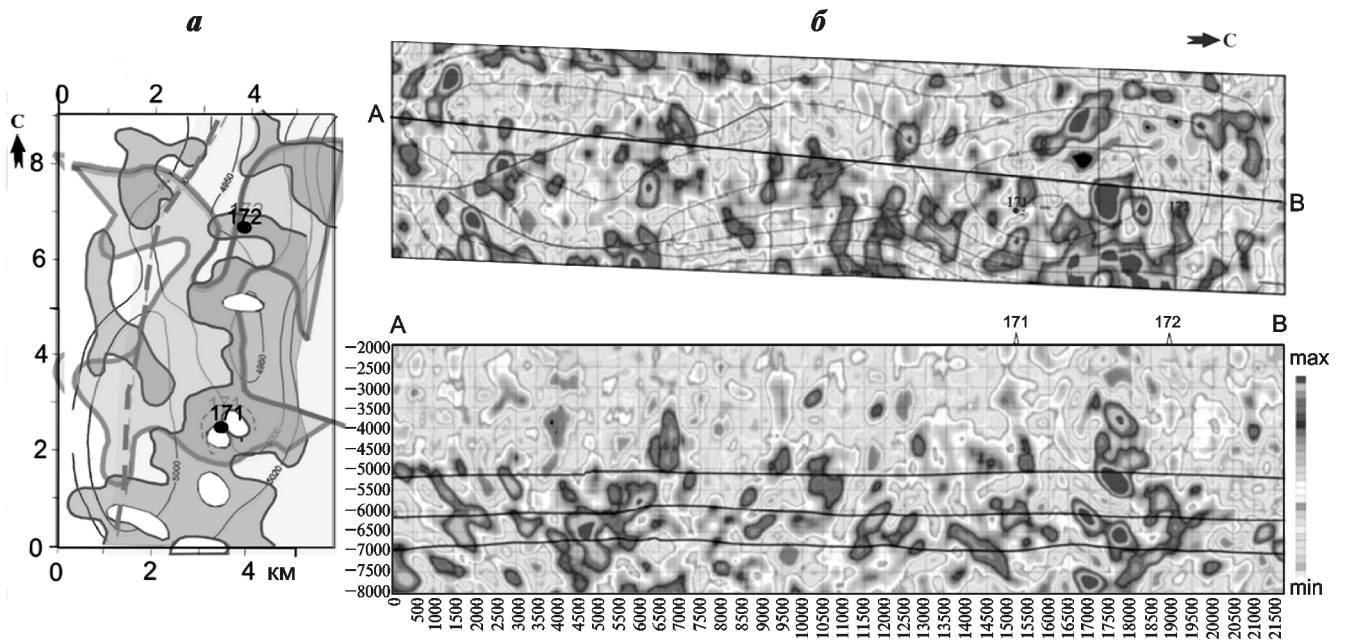


Рис. 3. Сопоставление результатов сейсмических исследований по технологиям: *a* — структура кровли продуктивной толщи (изогипсы) и граница кровли соляного купола (пунктир) — по ОВ, поле содержания углеводородов — по волнам МСЭ, участки высокой трещиноватости — по РВ; *б* — структурный срез и вертикальный разрез — 3D-поле интенсивности открытой трещиноватости

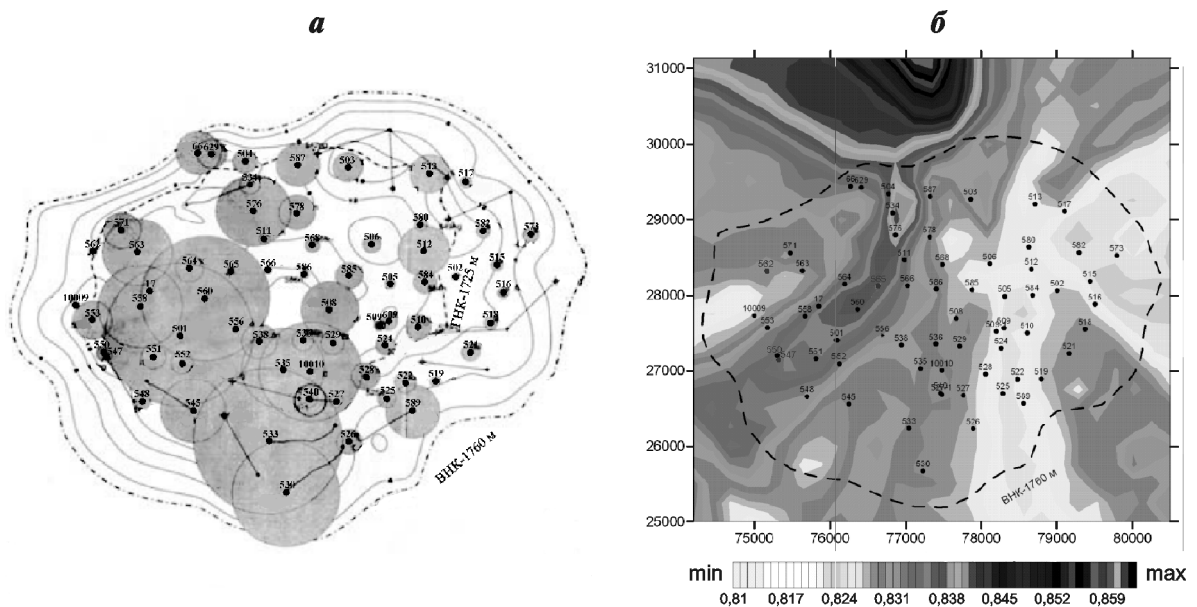


Рис. 4. Структурная карта по кровле ассельских отложений, расположение добывающих скважин и накопленная добыча по скважинам за весь период эксплуатации (*a*) и поле значений нефтесодержания по данным МСЭ (*б*). Размер круга пропорционален накопленной добыче из скважины

скважины было учтено, что скважина попадает в аномалию трещиноватости с глубокозалегающими «корнями», поэтому может быть получен аномально высокий приток УВ (рис. 3,б). После завершения бурения и испытания скважины № 172 получен приток газа, максимальный для южной части Предуральяского прогиба.

Уникальный пример применения технологии СЛОЭ — результаты изучения нефтесодержания залежи в ассельских отложениях (восточная часть Оренбургского нефтегазоконденсатного место-

рождения) [Ivanov et al., 2008] на завершающей стадии разработки, так как к началу выполнения СЛОЭ-мониторинга (июль 2007 г.) из более чем 60 добывающих скважин периодически работали только 4. В структурном отношении залежь имеет антиклинальную (куполовидную) форму с амплитудой ~60 м и площадью ~20 км² (рис. 4,а). Информация о накопленной добыче скважин (за весь период их эксплуатации), представленная на рис. 4,а, показывает, что ~15% скважин добыли ~85% нефти. Процесс почти полного истощения

залежи произошел за очень короткий срок (меньше 20 лет). Поэтому результаты исследований по технологии СЛОЭ смогли показать причины быстрого истощения залежи и перспективы ее будущей разработки.

Сейсмические исследования СЛОЭ были выполнены на площади 35 км² (рис. 4,б). Апертура приема с диаметром 1,2 км находилась в северной части залежи (рис. 4,а). Мониторинг сейсмического волнового поля проводили в течение 30 сут. Для каждой равноотстоящей точки обзора продуктивной толщи (с шагом 20 м по осям *x*, *y*) был получен временной ряд (с шагом дискретизации 10 с) энергии МСЭ (рис. 1), по которым рассчитаны значения коэффициента автокорреляции (при фиксированной задержке τ), имеющие доминантную зависимость от неравномерности нефтесодержания продуктивной толщи [Кузнецов и др., 2007]. Результат окончательной обработки — качественное распределение нефтесодержания — показан на рис. 4,б.

Сопоставление результатов обработки и промысловых данных по скважинам позволило установить, что, во-первых, вышеупомянутые 4 работающие добывающие скважины находятся в линейной зоне повышенного нефтесодержания и, во-вторых, низким значениям нефтесодержания (по АКФ) соответствуют в большинстве случаев скважины с низкой накопленной добычей нефти, что особенно заметно в восточной части площади. На основе этого анализа сделан вывод, что результаты обработки соответствуют реальной ситуации неравномерного нефтесодержания в ловушке и могут быть использованы для геологической интерпретации.

Основные результаты интерпретации заключались в следующем. Севернее площади и частично на ее границе находится субвертикальная зона аномально высокого нефтесодержания и интенсивной открытой трещиноватости, по которой флюид, в том числе нефть, поднимается

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арутюнов С.Л., Кузнецов О.Л., Карнаухов С.М. и др. АНЧАР — новые принципы разведочной геофизики // Сб. тез. Междунар. геофиз. конф. и выставка ЕАГО (15–18 сентября 1997 г., Москва). М., 1997. С. 6–7.

Ведерников Г.В., Максимов Л.А., Чернышова Т.И. Прогноз залежей углеводородов по характеристикам микросейсм: Мат-лы XI ежегодной междунар. конфер. «Гальперинские чтения — 2011». М.: ЦГЭ, 2011.

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Недра, 1975.

Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Дыбленко В.П. и др. Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред. Т. 3. Новые технологии и решение прикладных задач. М.: ООО «Центр информационных технологий и природопользования», 2007. 434 с.

Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Курьянов Ю.А. и др. Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред. Т. 2. Экспериментальные исследования. М.:

вверх [Кузнецов и др., 2007] и далее движется через ловушку на юг по магистральному каналу, который имеет высокую проницаемость и отождествляется с линейной зоной повышенного нефтесодержания. Заполнение ловушки нефтью через этот канал происходило неравномерно (судя по накопленной добыче), наиболее полное насыщение образовалось в юго-западной части ловушки, а минимальное — в северо-восточной. Отсутствие равномерного и полного заполнения ловушки, возможно, определило достаточно быстрое истощение залежи при относительно густой сети добывающих скважин, часть из которых имеет горизонтальные стволы.

Каковы перспективы дальнейшей эффективной разработки этой залежи? На основе полученной по технологии СЛОЭ информации возможны, по нашему мнению, два относительно эффективных варианта добыча нефти на залежи. Первый вариант заключается в бурении 3–4 скважин с горизонтальными стволами ортогонально простиранию зоны высокого нефтесодержания, тогда нефть будут добывать эти скважины. Другой вариант заключается в консервации разработки залежи, контроле за заполнением ловушки нефтью, а после естественного наполнения ловушки — «нефтехранилища» (через 10–20 лет) возможна новая разработка на основе существующей инфраструктуры промысла.

Заключение. Приведенные примеры использования рассеянных и эмиссионных волн при выполнении сейсмических исследований на разведываемых и разрабатываемых месторождениях УВ доказывают возможность существенного расширения информационной базы для решения широкого спектра геологических, промысловых, экономических и других задач, что позволяет выбрать оптимальные тактические и стратегические решения для эффективного освоения месторождений УВ.

Гос. науч. центр Российской Федерации — ВНИИгеосистем, 2004. 362 с.

Тимурзиев А.И. Современное состояние практики и методологии поисков нефти — от заблуждений застоя к новому мировоззрению прогресса // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2010. № 11. С. 20–32.

Ivanov S.I., Karnaukhov S.M., Dnistriansky V.I. Survey of heterogeneity of oil-gas saturation of reservoir using seismic emission waves SLEC technology // EAGE 70th Ann. Int. Conf. and Exhibition Extended Abstracts. 2008. P. 234.

Kuznetsov O.L., Lyasch Y.F., Chirkin I.A. Long-term monitoring of microseismic emissions: Earth tides, fracture distribution, and fluid content // Soc. Explor. Geophys. and Americ. Association of Petroleum Geologists. 2016a. Vol. 4, N 2. P. T191–T204.

Kuznetsov O.L., Chirkin I.A., Radwan A.A. et al. Combining seismic waves of different classes to enhance the

efficiency of seismic exploration // SEG Intern. Expos. and 86th Ann. Meeting. 2016b. P. 3001–3005.

Meltchouk B.Y., Kuznetsov O.L., Chirkin I.A. Combined Seismic Survey Based on the Use of Different Types of Seismic Waves (CT-Seismic) — Conception and Case Studies // 69th EAGE Ann. Int. Conf. and Exhibition Extended Abstracts. 2007. C046.

Mukhamedzyanov R.N., Slionkin S.I., Chirkin I.A. Exploration of HC in riphean deposits of east Siberia (Kuyumba) based on fracturing study // EAGE 67th Ann. Int. Conf. and Exhibition Extended Abstr. 2005. P305.

Sheriff R.E., Geldart L.P. Exploration Seismology. Cambridge University Press, 1995. 495 p.

Поступила в редакцию
16.11.2016