

ВРЕМЯ ИСКАТЬ И РАЗВИВАТЬСЯ

У нас, чтобы остаться на месте, надо бежать изо всех сил.
А чтобы попасть куда-нибудь, надо бежать в два раза быстрее.

Л. Керрол, «Алиса в стране чудес»

В статье изложена история создания, текущее состояние и перспективы развития низкочастотного сейсмического зондирования - инновационного метода поиска и разведки залежей углеводородов. Приведены причины и обстоятельства возникновения метода, описываются основные этапы его развития. Отмечается личный вклад руководителей и специалистов, участвовавших в его теоретическом обосновании и внедрении в практику геологоразведки. Рассматриваются ключевые научные и технологические аспекты метода и некоторые результаты работ с использованием метода.

Ключевые слова: инновации, геофизические методы, залежи углеводородов, микросейсм, численное моделирование, суперкомпьютеры.

Воспроизводство минерально-сырьевой базы старых нефтедобывающих территорий, находящихся на 3-й и 4-й стадиях разработки, к которым относится территория Республики Татарстан, обладает рядом особенностей (Нефтегазосность..., 2007). Прирост запасов осуществляется, преимущественно, за счет разведки малых месторождений и доразведки эксплуатируемых месторождений в краевых зонах. Эти объекты характеризуются сложным геологическим строением: структурные ловушки малоамплитудны, малоразмерны и осложнены замещениями, выклиниваниями, врезами и тектоническими нарушениями. В этих условиях структурная сейсморазведка снижает свою эффективность, а традиционные легкие методы: высокоточная гравиразведка, электроразведка, геохимические исследования недостаточно информативны.

Таким образом, возникает необходимость комплексирования сейсморазведки с другими геофизическими методами и технологиями.

В 2002 году по инициативе академика Р.Х. Муслимова в Республике Татарстан в качестве метода локального прогноза нефтеносности был опробован метод DISCH, во многом аналогичный пассивному методу АНЧАР (Графов, 1996). Работы проводились московскими специалистами на двух площадях и дали неоднозначные результаты. С одной стороны, прогноз нефтеносности по данному методу вступал в противоречие с имеющимися представлениями о геологическом строении и бурение не проводилось. С другой – микросейсмический шум на нефтеперспективных территориях и вне их имел явные отличия. Такая двойственность результатов и необходимость в эффективном методе локального прогноза привели к проведению большого комплекса экспериментальных и теоретических исследований, проведенных авторами совместно с рядом ученых Института математики и механики им. Н.Г. Чеботарева Казанского государственного университета.

В результате анализа полевых данных по этим двум площадям, было установлено, что большинство спектральных пиков Заречной площади имели ярко выраженный узкополосный характер и концентрировались вокруг добывающих скважин. Это заставило предположить, что многочисленные спектральные максимумы вызваны работающим скважинным оборудованием. Стало понятно,

что распределение интенсивности микросейсм по Заречной площади, построенное московскими специалистами, отражало близость точки наблюдения к работающим скважинам.

По Дачной площади анализ показал отсутствие узкополосных шумов, но единственный наблюдаемый максимум в области 2.5 Гц наблюдался по всей территории исследований приблизительно с равной интенсивностью. Согласно господствующей в то время теории генерации спектральных аномалий непосредственно залежью (Графов, 1996) это означало наличие нефтенасыщения на всей территории исследований, что явно противоречило уже имеющейся геологической информации. Возникло предположение, что шум залежи мог наблюдаться не только непосредственно над залежью, но и на некотором расстоянии от нее. Так как наблюдения проводились одновременно тремя датчиками в каждой точке исследования, для поиска залежи были рассчитаны волновые вектора зарегистрированных микросейсм. Очевидно, что если шум генерируется залежью, то волновые вектора будут направлены от залежи. Таким образом, построив поле волновых векторов, мы должны были получить указание на центр источника шума, т.е. залежь. Было установлено, что волновые вектора выстроились практически параллельно, и указывали на область вне площади исследований. Более того, в ряде случаев углы прихода микросейсм согласованно меняли направление, что никак не могло быть вызвано залежью, так как изменение угла прихода волны на неподвижной точке исследования означало, что источник шума движется. Анализ окружающей обстановки показал, что зарегистрированные микросейсмы приходили со стороны с автозаправочной станции на пересечении двух автодорог.

Казалось бы, на этом на микросейсмических исследованиях в Республике Татарстан можно было ставить точку. Метод явно походил на один из так называемых методов альтернативной науки. Вспомним, что в 90-е годы, после исчезновения идеологического контроля над научными исследованиями активно расцвели всевозможные «альтернативные ученые», которые состояли из шарлатанов либо просто искренне заблуждающихся малограмотных субъектов. Они активно продвигали свои чудо-методы во многих областях науки и техники. В геологию также

ринулись всевозможные деятели, предлагавшие методы на основе отрицаемых академической наукой торсионных и микролептонных полей и других якобы ранее секретных разработок.

Микросейсмические исследования, природа которых характеризовалась первооткрывателями эффекта как «дыхание залежи», «странный аттрактор», «детерминированный хаос» (Графов, 1996) и другими аналогичными терминами, казалось бы, хорошо укладывались в ряд псевдонаучных методов. Однако существовали и противоположные аргументы. В отличие от торсионных и микролептонных микросейсмических регистрировались обыкновенной сейсмологической аппаратурой и являлись объектом изучения вполне официальной науки сейсмологии. Видимо, Ренат Халиуллович Муслимов руководствовался этим фактом, когда настаивал на дальнейшем изучении возможностей микросейсмических исследований, несмотря на, мягко говоря, двусмысленные результаты первоначальных исследований.

Отправной точкой продолжения работ является вывод, что микросейсмические приходили в точку исследований со стороны источника преобладающего шума и генерируются источниками, в том числе техногенного характера и распространяются в земной коре. Но, если на Заречной площади они несли на себе явный отпечаток спектра источника шума, то на Дачной - шум генерировался движущимся транспортом и согласно теоретическим оценкам должен был иметь равномерный спектральный состав, близкий к белому шуму, либо к фликкер-шуму, если учесть затухание в среде. Вместо этого наблюдался устойчивый во времени и ярко выраженный по амплитуде спектральный максимум. Особенно обращал на себя внимание резкий спад амплитуды спектральной плотности от максимума в сторону нижних частот. Такое поведение характерно для волн, распространяющихся в волноводах, где спектральный состав мод резко начинается с некоторой минимально возможной для конкретного волновода частоты и спадает по амплитуде в сторону высоких частот (Бреховских, 1973). Проведенные авторами совместно с проф. М.Б. Плещинским оценки спектрального состава собственных колебаний волновода, образованного дневной поверхностью и кристаллическим фундаментом, дали положение возможных частотных максимумов, близким к наблюдаемому на Дачной площади.

Волноводная, или резонансная, гипотеза хорошо объясняла и наличие максимума в отсутствии нефтенасыщения в разрезе и направленность волновых векторов от дороги, по которой непрерывно двигался автотранспорт. Это также давало основание полагать, что в Западной Сибири и Оренбургской области, где ранее проводилось большинство микросейсмических исследований, максимум в районе 2 – 3 Гц действительно мог быть вызван залежами, залегающими на глубинах 2 – 3 километров, и метод микросейсмических исследований все-таки имеет право на существование. Было выдвинуто предположение, что положение спектрального максимума зависит по гиперболическому закону от глубины залегания любой резкой сейсмомеханической границы, в частности залежи углеводородов. Расчеты показали, что для Республики Татарстан при разведке на залежи в среднем карбоне - верхнем девоне необходимо было просто изменить

частотный диапазон с 2 – 3 Гц на 4 – 6 Гц. Наличие спектральных максимумов в спектрах микросейсм в этих диапазонах означало наличие нефтенасыщения в целевых горизонтах (Биряльцев и др., 2005).

Для проверки этих умозаключений требовался объект, где залежь располагалась на глубинах порядка километра. Однако нефтяные компании не проявляли большого желания быть объектами экспериментов. Надо отдать должное руководителю ЗАО «Нефтеконсорциум» Ф.Х. Валиеву, который рискнул выдать один из своих объектов (Ерыклинское месторождение), под исследования совершенно неопробованным методом.

Ерыклинское месторождение было первым, на котором авторы проверяли свой собственный метод, названный за предполагаемую зависимость частоты аномалии от глубины залегания залежи методом низкочастотного сейсмического зондирования (НСЗ). После получения полевого материала выяснилось, что записи изобилуют узкополосными помехами, так как на исследуемой территории шла добыча нефти и проводилось бурение. Вместе с тем, в некоторых точках на фоне многочисленных узкополосных помех отчетливо выделялись максимумы в диапазоне 4 – 6 Гц, которые показывали хорошую пространственную группировку. Сопоставление данной группировки с имеющейся геологической информацией показало, что точки с аномалией хорошо коррелируются с границами поднятия, выделенными структурным бурением по кровле асельского яруса нижней перми.

Последующее бурение Ерыклинского поднятия дало подтверждение правильности прогноза нефтеносности по максимуму 4 – 6 Гц. Скважина, пробуренная в прогнозном контуре, дала приток нефти, а скважина, пробуренная вне контура – приток воды. Дальнейшие исследования на объектах ЗАО «Нефтеконсорциум» (Эллинское, Мало – Титовское) также показали информативность выделяемого максимума как индикатора нефтенасыщения в карбоне. Исследованиями на Саврушкинской площади установлено, что выделенное по структурной сейсморазведке поднятие распадается на две перспективные площади. Пробуренная в центре поднятия скважина попадала между этими выделенными площадями и вскрыла пласт с остаточной нефтенасыщенностью.

Одним из первых в новый метод поверил и В. Н. Чукашов, в то время главный геолог ЗАО «Меллянефть». Он выделил под исследования несколько объектов, и на первых порах, не обошлось без уловок с его стороны. Так, в районах некоторых скважин на Дубравном и Грачевском месторождениях, обозначенных на картах как добывающие, спектральные аномалии отсутствовали. Пришлось, исключать эти точки их нефтеперспективной зоны, что, естественно, вселяло сомнение в адекватность прогноза. На защите отчета выяснилось, что «карты устарели» и скважины либо переведены под нагнетание, либо законсервированы за отсутствием притока.

Расширение территории проведения исследования НСЗ, показало, что характер спектров значительно изменяется от площади к площади. В районах, приуроченных к восточному борту Мелекесской впадины, аномалии проявлялись весьма ярко, тогда как на склонах ЮТС их интенсивность была не столь высока при сопоставимых параметрах залежи. Значительную проблему составлял выбор

уровня аномалии, по которому следовало проводить границу нефтеперспективной площади. В этот период неоценному помощнику в геологической интерпретации результатов НСЗ оказал В.Б. Либерман. Его знания геологического строения исследуемых площадей и характера поисковых объектов позволили правильно интерпретировать поведение спектральных аномалий на различных площадях и давать адекватный прогнозный контур.

Параллельно с опытными работами продолжались теоретические исследования природы возникновения аномалий в реальной геологической среде. Аналитические расчеты, проведенные В.Л. Кипотем и Д.Н. Тумаковым, показали, что для характерного сейсмомеханического разреза Татарстана спектр микросейсм может содержать несколько десятков максимумов в диапазоне от 0.5 до 10 Гц. Эти максимумы соответствовали собственным частотам различных порядков волноводов дневная поверхность – контрастная граница (Кипоть, 2008). Рассчитать их интенсивность аналитически не представлялось возможным, а это означало, что теоретически залежь могла дать максимум в любой точке анализируемого спектрального диапазона. Вселяло надежду то, что в диапазонах 2 – 3 и 4 – 6 Гц происходила концентрация собственных частот, что соответствовало реально наблюдаемым максимумам. Однако это не давало гарантии, что при незначительных изменениях сейсмомеханических параметров разреза максимумы не изменят кардинально своего положения.

В отсутствии аналитических методов расчета теоретического спектра микросейсм для произвольного сейсмомеханического разреза единственным путем являлось численное моделирование. Первые расчеты, произведенные Д.В. Бережным с использованием пакета ANSYS, показали, что тонкие высококонтрастные слои, которыми моделировалась залежь, действительно вызывают значительное изменение спектрального состава микросейсм. Однако для требуемой детальности расчетов универсальные пакеты считали слишком медленно. Доступные в то время сейсмические пакеты рассчитывали синтетические сейсмограммы упрощенными методами и также не подходили для полноволнового численного моделирования. В связи с этим под руководством Д.В. Бережного Т.Е. Бирыльцевой был разработан оригинальный моделирующий комплекс, который позволил провести ряд вычислительных экспериментов, подтвердивших образование спектральных максимумов в наблюдаемых диапазонах для реальных сейсмомеханических характеристик геологического разреза (Бережной и др., 2008).

Успешность первых опытно-промышленных работ и нарастающее теоретическое обоснование позволило Р.Х. Муслимову в 2005 году рекомендовать метод НСЗ при проведении ГРП, по его инициативе результаты исследований неоднократно докладывались на совещаниях различного уровня. Большое внимание к новому методу проявляла и И.Н. Плотникова, в то время начальник отдела углеводородного сырья Министерства экологии и природных ресурсов РТ, совместно с которой производился подбор конкретных площадей исследований и анализ результатов многих исследований. Именно она инициировала первый доклад о методе НСЗ на международном уровне (Birialtsev, Plotnikova et al., 2006).

В 2005 году были проведены исследования на 15 пло-

щадях на лицензионных участках ННК, относящихся к восточному борту Мелекесской впадины, северному, западному и восточному склонам Южно-Татарского свода. Несмотря на то, что поисковые объекты были малоразмерны и отличались, зачастую, сложным геологическим строением, как, например, Южно-Ферганское поднятие Акбязовской площади, успешность разведочного и эксплуатационного бурения с учетом данных НСЗ оставалась высокой. На площадях, исследованных НСЗ в 2005 году, было пробурено 38 скважин, 37 из которых подтвердили прогноз. Такие результаты обратили на себя внимание главного геолога ОАО «Татнефть» Р.С. Хисамова, который, дал шанс технологии НСЗ показать себя на объектах ОАО «Татнефть». Этот шанс был использован, и бурение на Черноозерском поднятии, одном из первых объектов ОАО Татнефть, исследованных методом НСЗ, показал адекватность прогноза. Вместе с тем, расширение в 2006 – 2007 годах территорий исследований и новых геологических условий залегания поисковых объектов вызвали ряд неподтвержденных прогнозов на западе Татарстана и в Оренбургской области. Ярко выраженные аномалии в диапазоне 4 – 6 Гц, однозначно свидетельствующие о наличии углеводородов в разрезе в районах Южно-татарского свода и Мелекесской впадины, в других геологических условиях оказались обусловленными совершенно иными факторами. Как показало проведенное постфактум численное моделирование, аномалия на площади в западне Татарстана была вызвана неоднородностями в верхней части разреза, а аномалия на площади в Оренбургской области – наличием мощных солевых горизонтов.

Неподтвердившиеся прогнозы и накопление большого объема фактического материала стимулировали дальнейшее развитие теории и методики низкочастотного сейсмического зондирования. Исследования проводились в трех направлениях – изучение феноменологии эффекта, в частности выявление поисковых признаков в различных геологических условиях, внедрение численного моделирования в практику производственных работ и установление связи между параметрами залежей и параметрами наблюдаемых спектральных аномалий.

Изучение В.А. Рыжовым, в рамках кандидатской диссертации, большого объема накопленного фактического материала позволило разработать оригинальный метод устранения техногенного шума при проведении работ вблизи работающего скважинного оборудования и других устройств и механизмов (Рыжов, 2008). Этот метод позволил эффективно проводить доразведку разрабатываемых месторождений в краевых зонах. При изучении спектров микросейсм с большим разрешением была также выявлена тонкая структура всех спектральных максимумов, вызываемая залежами углеводородов, что позволило расширить набор поисковых признаков (Rizhov, Birialtsev, 2008).

Наиболее эффективным методом изучения спектра микросейсм является его сопоставление с теоретическими спектрами, рассчитанными с использованием численной модели. Численное моделирование использовалось авторами для обоснования адекватности резонансной гипотезы формирования спектральных аномалий над залежами углеводородов (Бирыльцев, Бережной и др., 2008), однако его применение в практике сдерживалось боль-

шим временем расчетов каждого варианта расположения залежи в разрезе. Для промышленного использования необходимо было ускорение расчетов в несколько десятков раз, что требовало применения суперкомпьютерных вычислений. Применение кластеров или других архитектур на универсальных процессорах было нереально как с финансовой, так и с организационной стороны. В 2008 году появилась технология CUDA компании nVidia, которая позволяла проводить расчеты на мощных видеокартах до 100 раз быстрее, чем на наиболее мощных процессорах компании Intel. Настольный компьютер с хорошей видеокартой и использованием технологии CUDA соответствовал по производительности кластеру стоимостью около \$1 млн. Моделирующий комплекс был модифицирован для работы с данной технологией, было закуплено соответствующее оборудование и моделирование вошло в практику применения метода НСЗ.

Еще одним важным результатом было выявление связи между параметрами залежи и параметрами аномалии НСЗ. Здесь проблема заключалась в отсутствии сопоставимого материала. Исследования методом НСЗ производились преимущественно на малоразмерных поднятиях и на площади исследований впоследствии бурилось не более 5 скважин, что не позволяло провести статистический анализ. Одним из немногих исключений явилось Уратьминское месторождение, где были пробурены 10 скважин. Сопоставление результатов исследований НСЗ с параметрами залежи, проведенное А.А. Вильдановым, позволило выявить некоторые тенденции. Исследования, в частности показали наличие корреляции между выраженностью аномалии над фоном (параметр сигнал/шум) и нефтенасыщенностью а также нефтенасыщенной толщиной (Вильданов, Биряльцев и др., 2008).

Проведенные исследования позволили повысить успешность метода НСЗ на новых территориях, как пределах Республики Татарстан, так и в республиках Коми, Калмыкии, Удмуртии, Самарской и Оренбургской областях. В целом успешность метода НСЗ за 2005 – 2008 года составила около 85 процентов.

В 2008 – 2009 гг. были установлены научные связи с исследовательскими организациями и коммерческими компаниями, использующими микросейсмический анализ в геологоразведке. Были проведены ряд двусторонних НТС с Институтом Физики Земли им. О.Ю Шмидта, компанией «Анчар» и компанией «Spectraseis» (Цюрих). В 2009 году на базе Академии Наук Республики Татарстан был проведен международный научно-технический семинар под председательством Р.Х. Муслимова, на котором сделали доклады представители всех вышеперечисленных организаций, а также заведующий кафедрой разведочной геофизики РГУ нефти и газа им. Губкина проф. В.И. Рыжков. Семинар показал, что теория и методика низкочастотного сейсмического зондирования ЗАО «Градиент» находится в данном направлении на высоком уровне, а по ряду позиций, в частности по использованию математического моделирования, опережает разработки как отечественных, так и зарубежных компаний и выводит ее в лидирующее положение.

Кризис 2009 года заставил многие нефтедобывающие компании снизить объем геологоразведочных работ, в том числе и по методу низкочастотного сейсмического зонди-

рования. Вместе с тем, появилась возможность переосмыслить некоторые накопленные результаты, провести давно запланированные эксперименты. В частности, выполнены опытные работы по мониторингу разработки залежей, которые показали принципиальную возможность изучения структуры флюидопотоков при разработке нефтяных месторождений. Разработан метод ранговой корреляции спектров, который позволил автоматизированным образом учитывать суточные вариации спектров микросейсм и выявлять слабые аномалии на малоперспективных площадях. Разработан и опробован метод корреляционного анализа микросейсм во временной области, который, в перспективе, позволит полностью исключить субъективизм в оценке нефтеперспективности точек наблюдения НСЗ. Интенсивно ведутся работы по автоматизированному комплексированию данных НСЗ с полевыми данными сейсморазведки МОГТ. Ведется техническое перевооружение компании аппаратурой нового поколения, способной работать в экстремальных условиях как Крайнего Севера, так и в условиях пустынь. Устанавливаются новые деловые контакты с российскими и зарубежными нефтедобывающими компаниями, результаты практических и теоретических работ докладываются на самых престижных российских и международных конференциях. Метод продолжает развиваться как в сторону повышения достоверности и обоснованности прогноза, так и в сторону расширения спектра решаемых задач.

Последнее время с самых высоких трибун говорится о необходимости перевода экономики страны на инновационные рельсы. Одним из путей развития инновационных технологий являются так называемые научно-производственные кластеры, предполагающие развитие новых технологий на базе традиционных отраслей экономики. История развития метода НСЗ показывает, что такой путь действительно работает. Именно сочетание реальных потребностей нефтедобывающих компаний и наличие научных школ в области геологии, математики, физики, механики и вычислительной техники позволило развить технологию низкочастотного сейсмического зондирования от авторского качественного метода до высокоавтоматизированного процесса с использованием суперкомпьютерных технологий. Но эта же история показывает, что самым главным фактором в достижении результата является наличие реального желания двигаться по инновационному пути и политической воли это желание осуществить, несмотря на проблемы и неудачи.

Литература

Бережной Д. В., Биряльцев Е. В., Биряльцева Т. Е. и др. Анализ спектральных характеристик микросейсм как метод изучения структуры геологической среды. Казань: Изд-во Каз. гос. ун-та. 2008. 360-386.

Биряльцев Е.В., Рыжов В.А., Шабалин Н.Я. Особенности интерпретации спектральных характеристик природных микросейсм для локального прогноза нефтеносности в условиях республики Татарстан. *Прием и обработка информации в сложных информационных системах.* № 22. 2005. 113-120.

Биряльцев Е.В., Бережной Д.В., Биряльцева Т.Е., Храменков М.Г. Результаты численного моделирования распространения природных микросейсм в зонах залегающих нефтегазовых залежей. Мат. науч. конф.: «ГЕОМОДЕЛЬ-2008». 2008.

Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. 2 изд. М. 1973.

Вильданов А.А., Биряльцев Е.В., Ерошина Е.В., Биряльцева Ю.Е., Рыжов В.А. Некоторые корреляционные зависимости меж-

ду параметрами аномального низкочастотного спектра микросейсм и характеристиками геологического разреза. Мат-лы науч. конф.: «ГЕОМОДЕЛЬ-2008». 2008.

Графов Б.М. и др. Анализ геоакустического излучения низкочастотной залежи при использовании технологии АНЧАР. *Геофизика*. №5. 1996. 24-28.

Кипоть В.Л. Частотно-избирательные свойства стратифицированной геологической среды. *Георесурсы*. 2(24). 2008. 18-21.

Нефтегазосность Республики Татарстан. Геология и разработка нефтяных месторождений. Под ред. Р.Х. Муслимова. Т.1. Казань: «Фэн». 2007. 316.

Рыжов В.А. Оптимизационный метод фильтрации квазигармонических помех с сохранением фонового уровня шума при изучении природных микросейсм. *Сейсмические приборы*. Москва: Изд-во ИЗФ РАН. 2008. Т. 44. № 4. 19-26.

Birialtsev E.V., Plotnikova I.N., Khabibulin I.R., Shabalin N.Y. The analysis of microseisms spectrum at prospecting of oil reservoir on Republic Tatarstan. *Proceed. of Conf.: «EAGE»*. Russia. 2006.

Rizhov V., Birialtsev E. The microseism spectral analysis at the range from 1 to 20 Hz for the geology prospecting. *Geophysical Research abstracts. EGU*. 2008.

N.YA. Shabalin, E.V. Biryaltsev. **Time to seek and develop.**

The article described the history of creation, the current state and prospects of low-frequency seismic sensing - an innovative method of prospecting and exploration for hydrocarbon deposits. We give the reasons and conditions for the design of the method, describes the main stages of its development. We show the contribution of leaders and professionals involved in its theoretical foundation and implementation in practice of geological exploration. Consider the key scientific and technological aspects of the method and some results of using the method.

Key words: innovation, geophysical methods, the deposits of hydrocarbons, microseisms, numeric modeling, supercomputers.

Николай Яковлевич Шабалин

Генеральный директор ЗАО «Градиент»

Евгений Васильевич Биряльцев

К.т.н., руководитель информационно-аналитического центра ЗАО «Градиент», зав. Лаб. НИИММ им. Н.Г. Чеботарева Казанского государственного университета.

420015, Россия, Казань, ул. Большая Красная, 63. Тел./факс: (843)238-32-43.