

ОТОБРАЖЕНИЕ ГИПЕРБАЗИТОВОЙ ИНТРУЗИИ В ЧАСТОТНО-СПЕКТРАЛЬНОМ ПОЛЕ МИКРОСЕЙСМ НА ПРИМЕРЕ РУССКО-ЖУРАВСКОГО УЧАСТКА, ЮГО-ВОСТОКА ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

В. И. Дубянский, К. Ю. Силкин

Воронежский государственный университет

По результатам измерения поля микросейсм над известным интрузивным телом, залегающим в кристаллическом фундаменте, получены частотно-спектральные изображения осадочного чехла, интрузии и вмещающей толщи в вертикальном разрезе. Сравнение спектральных изображений с результатами бурения показало, что разрешающая способность изображений достаточна для выявления не только основных но и детальных особенностей геологического строения среды.

Исследования микросейсмических (шумовых) полей проводятся в нашей стране различными организациями с целями, ориентированными, главным образом, на решение академических задач сейсмологии, или нефтегазовой геофизики [1]. Применения этих методов в области рудной геологии и геофизики, для детального исследования, картирования и локации кристаллического фундамента и осадочного чехла платформ — практически не известны.

В полевом сезоне 2006 года нами проведены опытно-методические работы по выяснению возможностей использования естественного микросейсмического поля, для картирования и локации геофизических неоднородностей в кристаллическом фундаменте, перекрытом осадочным чехлом. В качестве эталонного объекта был выбран интрузивный массив базит-гипербазитового состава, залегающий в песчано-сланцевой метаморфической толще Воронцовской серии нижнего протерозоя, в районе с. Русская Журавка (рис. 1а). Интрузив хорошо изучен геофизическими методами и бурением. В створе линий бурения отработаны сейсмические профили (VII-64 и VIII-64) методом КМПВ (ВГУ, 1964 г). Мощность осадочного чехла над интрузией, выходящей в эрозионный срез фундамента, составляет 90 м, а над вмещающими породами увеличивается до 120 м. В нижней части осадочного разреза залегает пласт мела мощностью от 45 до 55 метров. По данным бурения интрузив сложен крутопадающими пластами серпентинизированных перидотитов и серпентинитов, на контакте которых проявляется медно-никелевая минерализация. Граничные скорости продольных волн

в серпентинитах равны 3,0 км/с, а в перидотитах — 5,6 км/с. Таким образом контакт этих пород представляет собой жесткую акустическую границу (рис. 1б). Местоположение северо-восточного контакта интрузии и вмещающих пород, а так же направление его падения по данным бурения не установлены и на разрезе рис. 1б показаны условно. По графику граничной скорости этот контакт смещен к западу не менее чем на 100 м, что, очевидно, более соответствует действительности.

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ МИКРОСЕЙСМ

При проведении полевого эксперимента были использованы системы наблюдений в двух модификациях: линейная («Line») и точечная («Set»).

Система «Line» представляла собой линейную 18-ти канальную расстановку с расстоянием между каналами 50 м. Общая длина расстановки составляла 800 м, т.к. два канала в середине были совмещены. На каждый канал подключалось по четыре сейсмоприемника СВ-5 при их последовательном соединении. Сейсмоприемники устанавливались с заглублением в твердый грунт. На участке работ «Русская Журавка» в сезоне 2006 года было отработано три расстановки вдоль ПР 2 (рис. 1а). При смене стоянок пикет первого канала последующей расстановки совмещался с пикетом последнего канала предыдущей расстановки. Система «Line» предназначалась для выполнения непрерывных во времени (синхронных) многоточечных наблюдений с шагом, соответствующим стандартам МОВ ОГТ.

Система «Set» состояла из 12-ти каналов, которые устанавливались в одной точке с целью повышения чувствительности приемной установки и определения оптимального количества сейсмопри-

емников в группе. К каждому каналу подключалась группа из четырех сейсмоприемников, соединенных последовательно. Точки дискретной регистрации «Set» располагались на местности с интервалом порядка 400 м, вдоль профилей ПР 2 и ПР 3, пересекающих интрузию в ортогональных направлениях (рис. 1а). Регистрация сейсмических сигналов осуществлялась цифровой сейсмической станцией «Эхо-2». Запись проводилась при четырех режимах усиления. Длительность каждой записи составляла восемь секунд, частота квантования сигналов 2 мс. Привязка точек и линий наблюдений на местности проводилась системой GPS.

ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЯ МИКРОСЕЙСМ

Основная задача работ состояла в получении ответов на следующие вопросы: отображается ли интрузия в срезе фундамента и на глубину в микросейсмическом поле; имеются ли различия между интрузией и вмещающими породами кристаллического фундамента; как проявляются покрывающий фундамент осадочный чехол, рельеф фундамента и дневной поверхности? В методическом плане оценивалось информативное содержание непрерывных «Line» и дискретных «Set» систем наблюдения.

Для предварительного ответа на поставленные вопросы, записи микросейсмического волнового поля трансформировались из временной в спектральную область, которая, как показывает опыт, например [2], отображает структурные и упругие свойства среды. Определение природы зарегистрированных волн, их кинематический и динамический анализ, а также применение фокусирующих процедур с целью локации и томографии фундамента здесь не рассматриваются.

Обработка записей микросейсм состояла из следующих основных процедур: фильтрации сейсмограмм в полосе частот 0,05 — 40 Гц, получении Фурье-спектров, их нормирования, инверсии, интерполяции и масштабирования.

Частотная фильтрация сейсмограмм микросейсм ограничивалась верхним пределом в 40 Гц для исключения высокочастотных составляющих техногенных помех и режекторной частоты 50 Гц. Из практики применения сейсморазведки МОВ и КМПВ на ВКМ известно, что наиболее информативным диапазоном частот является 20—30 Гц. В сейсмологии больших и средних глубин применяются диапазоны частот от сотых долей до 1,0—10,0 Гц.

Спектральный анализ показал, что основная энергетика зарегистрированных микросейсмических волн и контрастная изменчивость спектральных составляющих в пунктах наблюдения в наибольшей степени проявляются в диапазоне частот от 2,0—3,0 Гц до 40 Гц, который и был выбран как основной, отображающий строение осадочного чехла и верхней части фундамента.

Формирование спектральных изображений разрезов проводилось методом инверсии нормированных к среднему значению амплитуд спектров микросейсм по профилям ПР 2 и ПР 3 (рис. 1 в, г). При этом, горизонтальная ось X-км изображения соответствует расстояниям между сейсмоприемниками системы «Line» (ПР 2) или пунктами наблюдения системы «Set» (ПР 3). Вертикальная ось F-частот направлена в нижнее полупространство по убыванию частоты от 40 Гц на поверхности до нуля. Значения амплитуд $A(F)$ спектров подвергались сглаживанию и интерполяции между трассами записей, для выявления областей устойчивой корреляции спектральных составляющих микросейсм и формирования амплитудно-частотного изображения среды в плоскости $A(X,F)$.

Сравнение изображений рис. 1 в, г показывает, что спектральная картина на профиле непрерывных наблюдений с плотным шагом (ПР 2) значительно детальнее и содержательней дискретных измерений (ПР 3). Интрузивное тело четко выделяется на всех полученных спектральных изображениях в виде интенсивной аномалии в диапазоне частот 2,0—14,0 Гц, между ПК 11 и 12 — юго-западный контакт и ПК 15—17 — северо-восточный контакт интрузии по ПР 2 (рис. 1 в) и между ПК 20—21 юго-восточный контакт на ПР 3. Принадлежность выявленных аномалий амплитудно-частотных спектров к интрузии устанавливается по совпадению местоположения контактных зон, размеров и форм спектральных аномалий по вертикали и в плане с геолого-геофизической моделью интрузивного тела. В частотном диапазоне рассматриваемых спектрограмм выше 14 Гц, очевидно, отображаются стратифицированные отложения осадочного чехла, в том числе пласт меловых отложений в промежутке 14—22 Гц в виде пониженных значений $A(X,F)$ (рис. 1в). Интенсивные спектральные аномалии в частотном диапазоне 26—40 Гц в верхней части разреза примыкают с внешних сторон к контактным зонам интрузива и маркируют эти ослабленные зоны, проявляющиеся в кристаллическом фундаменте, осадочном чехле и рельефе дневной поверхности.

Полученное «спектральное изображение» $A(X, F)$ воспринимается как метрический разрез вдоль линии наблюдения. Основанием такого восприятия являются установленные общезначимые представления о том, что составляющие спектра сейсмических волн (как объемных, так и поверхностных) распределяются по вертикали от низкочастотных на глубине к высокочастотным на поверхности среды. Кроме этого, установленными фактами являются увеличение амплитуды сейсмических волн при переходе в среду с пониженной скоростью (и обратный эффект), а также явление остаточной когерентности и локализации многократно рассеянного волнового поля в конечном объеме среды [4]. Указанные представления положены в основу интерпретации полученных спектральных изображений.

Разрез $A(X, F)$ точно воспроизводит изменчивость спектральных свойств среды по горизонтали (оси X) и качественно — по вертикали (оси частот F).

Формальный перевод частотной оси (F , Гц) в метрическую (Z , м) возможен путем трансформации частот F в волновые числа K , при использовании соотношения:

$$K = 2\pi/\lambda, [1/\text{м}]; \lambda = VT = V/F, [\text{м}];$$

откуда $K = 2\pi F/V, [1/\text{м}].$

Здесь $\pi = 3,14$; λ — длина волны; V — скорость волн в среде.

Пересчет осуществляется по формуле

$$Z = 1/K = 0,16; V/F = dV/F, [\text{м}], \quad (1)$$

В работе [3] предлагается оценивать мощность H_1 резонирующего слоя, характеризующегося скоростью V_1 , в микросейсмическом поле Земли по значениям частоты F_1 на которой наблюдается максимум амплитудно-частотного спектра:

$$H_1 = 0,25 V_1/F_1, [\text{м}], \quad (2)$$

Для оценки глубины проникновения волнового движения поверхностных волн Релея (мощности скин-слоя) по амплитудно-частотному спектру в работе [2] используется эмпирическая формула

$$H = 0,40 V/F, [\text{м}], \quad (3)$$

Из выражений (1), (2), (3) следует, что безразмерный коэффициент d перед отношением скоро-

сти к частоте имеет значения соответственно $d_1 = 0,16$; $d_2 = 0,25$; $d_3 = 0,40$. Два последних значения определяются конкретными гипотезами о природе зарегистрированных волн, а также сопоставлениями спектральных изображений с детально изученными геологическими объектами в нефтегазоносных районах.

По известным данным о скоростях сейсмических волн в покрывающей толще (1250 м/с) и фундаменте (3000 и 5600 м/с), результатам бурения и спектральным изображениям вычислялись значения коэффициента d , которые изменяются в пределах $d = 0,9$ — 1,12 — 1,28. Полученный результат свидетельствует о том, что в исследуемой среде типа слой, лежащий на вертикально-слоистом гетерогенном полупространстве, поверхностные волны и резонансные явления проявляются особым образом, требующим специального рассмотрения.

Коэффициент d в формуле (1) можно рассматривать как линейный масштаб $M(Z)$ преобразования вертикальной частотной координаты F в метрическую Z с учетом изменения скорости волн в среде с глубиной $V(Z)$:

$$d(Z) = M(Z) = ZF/V(Z), \quad (4)$$

На рис. 1д представлено спектральное изображение разреза по профилю 2 в метрической плоскости. На интервале глубин порядка 100—300 м, в центре профиля выделяется интрузия состоящая согласно данным бурения из двух видов пород: акустически мягких серпентинитов, проявленных интенсивным ярким пятном в левой юго-западной части и более жестких перидотитов, погруженных под поверхность фундамента с крутопадающим восточным контактом на ПК 15. Восточный контакт интрузива имеет размытую с вмещающими породами переходную зону в отличие от западного, который маркируется резкими градиентами амплитуд спектра микросейсм и интенсивности магнитного поля. Резонирующие в микросейсмическом поле субвертикальные и изометричные локальные объекты, размером от 30 до 100 м проявляются в разрезе в виде ярких пятен и включений, отображающих гетерогенный характер геологической среды.

Рис. 1. Проявление интрузивного массива в микросейсмических полях. Русско-Журавский участок, юго-восток Воронежского кристаллического массива. а — схема расположения пунктов наблюдения микросейсм и профили КМПВ (1964 г.), б — геологический разрез и график граничной скорости, в, г — распределение инвертированных спектров микросейсм в сечениях профилей 2 и 3, д — спектральное изображение разреза ПР-2 в метрической плоскости. Условные обозначения к рис. б: 1 — повышенные акустические свойства; 2—7 — породы осадочного чехла, 8 — кора выветривания, 9 — перидотиты, 10 и 11 — серпентиниты, 12 — метапесчаники, 13 — габбро, 14 — никелевая минерализация, 15 — разлом, 16 — отражающая граница.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Синхронно или разновремененно зарегистрированные микросейсмические (шумовые) волновые поля, возбужденные источниками, в общем случае, неизвестного происхождения, содержат обширную информацию о геологическом строении исследуемого района и конкретного объекта.

2. Показано, что амплитудно-частотные характеристики микросейсмических волн, измеренных по направлениям с регулярным и плотным шагом сейсмоприемников, представляют собой спектральные изображения среды, отображающие ее структурные и акустические свойства с близким приближением к реальности.

3. Индустриальные шумы больших городов, дорог, предприятий, а также атмосферные процессы типа постоянных сильных ветров, грозных явлений и т.п. — являются локальными и региональными источниками шумовых микросейсм, которые могут быть использованы для освещения недр на глубину от нескольких сот метров до единиц километров.

4. Исследования возможностей применения микросейсмических полей для научно-методичес-

ких и геолого-разведочных целей в рудных районах ВКМ должны быть продолжены на основе изучения разнообразных «эталонных» геологических объектов и структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубянский В.И. Современные достижения, тенденции и возможные перспективы микросейсмического телескопирования земной коры. Вестник ВГУ, сер. Геология, № 2, 2006, С. 182—185.

2. Горбатилов А.В. Возможность оценки параметров геологических объектов на основе использования фонового микросейсмического поля. Результаты экспериментальных исследований и моделирование. Международная сейсмологическая школа, Петергоф, 2006, С. 60—71.

3. Москвина А.Г. Спектральный отклик коры на сейсмические колебания. Изв. АН СССР. Физика Земли, 1987. № 1., 99 с.

4. Weaver Richard L. Information from seismic noise. Geophysics, VOL 307, SCIENCE, 2005, P. 1568—1569.

Поступила в редакцию 12.12.06 г.