© А.М. Мухаметшин, А.Г. Болгаров, 2011

УДК 622.235

А.М. Мухаметшин, А.Г. Болгаров

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА В МЕТОДЕ СКВАЖИННОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Приведены результаты геофизических исследований методом скважинной сейсмической томографии и ВСП на основе геоинформационной системы. Изучено физическое состояние массива пород площадки строительства высотной башни «Урал» Делового центра «Екатеринбург-Сити», оценено его структурно-тектоническое строение. Оценены упруго-деформационные и прочностные свойства пород, даны их квалификационные характеристики. Определена степень выветрелости и трещиноватости массива пород.

Ключевые слова: межскважинная томография, сейсмический мониторинг, геофизические методы, геоинформационная система, базы данных, базы знаний.

В комплексе геофизических методов, применяемых при инженерно-геологических исследованиях, метод скважинной сейсмической томографии в настоящее время занимает одну из ведущих позиций. Кинематические и динамические особенности распространения упругих волн в геологической среде позволяет не только на качественном уровне изучить строение среды, выявить ослабленные, нарушенные зоны, но также и количественно оценить упруго-деформационные и прочностные свойства массива пород в целом, и его отдельных участков. Существующие в настоящее время мощное аппаратное и программное обеспечение в скважинной сейсморазведке позволяет проводить исследования в условиях интенсивных электрических и механических помех, которые свойственны городским условиям исследований. Эффективность подобных исследований при решении инженерно-геофизических задач на глубоко урбанизированной территории (в центре г. Екатеринбурга) возрастает еще более при организации методического и программного обеспечения в виде геоинформационной системы.

Как известно, основная идея метода межскважинной томографии состоит в просвечивании среды сейсмическими лучами по определенной системе наблюдений и на основании наблюденных времен первых вступлений сейсмических волн построения карт скоростей распространения сейсмических волн, которые, в свою очередь, позволяют перейти к оценке упруго-деформационных и прочностных свойств пород межскважинной среды. Как уже отмечалось нами ранее [1], методика и технология межскважинной сейсмической томографии заключается в возбуждении упругих колебаний в одной скважине и приеме их в другой. В практике межскважинных сейсмотомографических исследований в зависимости от кон-

кретных задач и условий применяются различные системы наблюдений.

С целью достижения максимально возможного числа линий просвечивания, более полного по угловым координатам их покрытия исследуемой области (один из важных критериев качества решения томографической задачи) широко используется встречная веерная система наблюдений, которая и была применена на изучаемом объекте изысканий. Практически данная система реализуется последовательным перемещением приемного зонда вдоль всего исследуемого интервала глубин (от забоя до устья скважин) с заданным шагом (шаг приема) при фиксированном положении источника упругих колебаний. Такие наблюдения повторялись для различных положений фиксированного источника, который перемещался по стволу скважин с выбранным шагом возбуждения. При смене скважин возбуждения и приема технологический цикл повторялся. В результате получена серия вертикальных волновых полей, соответствующая сетке лучей, равномерно по-крывающей исследуемое межскважинное пространство. Для уменьшения неоднозначности в приповерхностной зоне и вблизи ствола скважины система межскважинного просвечивания комбинировалась системой просвечивания скважина – дневная поверхность [1], где с достаточной полнотой были представлены все необходимые сведения по методике исследований методом скважинной томографии. Поэтому далее в кратком виде представляются основные практические результаты, полученные на площадке строительства.

Такая комбинированная система наблюдений позволяет достичь наибольшей густоты лучей сейсмопросвечивания и дает возможность адекватного изучения среды в субгоризонтальном и в субвертикальном направлениях.

Основные параметры системы наблюдений (шаг наблюдения, шаг возбуждения) выбирались с учетом сейсмогеологических особенностей участка исследований, степени детальности исследований. По опыту работ в аналогичных сейсмогеологических условиях, а также с учетом требований технологии исследований, при межскважинном просвечивании шаг приема составил 2 м, шаг возбуждения – 4 м, в методе ВСП шаг приема – 1 м.

Учитывая предполагаемую сложность и неоднородность геологического строения изучаемого массива, а также специфическую особенность распространения упругих колебаний при межскважинном сейсмопросвечивании, прием упругих колебаний осуществлялся специализированной трехкомпонентной цифровой аппаратурой АМЦ ВСП – В (высокочастотный вариант) с симметричной (однородной) системой сейсмоприемников DF-8.

В сейсмогеологическом отношении участок исследований приурочен к верхним частям массива скальных пород, перекрытых относительно мощной (до 15 м) сильно выветрелой зоной, характеризующейся не высокими упругими свойствами пород, слагающих ее (из того же отчета, см. выше). В плане тектонического строения площадка изысканий расположена в пределах приконтактовой части Шувакшинского габбрового массива в непосредственной близости от субмеридионального Вкрхисетского разлома.

По данным наземной сейсморазведки, а также ультразвукового просвечивания образцов керна, отобранных в скважинах на соседней площадке проектируемой башни «Исеть», скорость продольной волны изменяется в диапазоне 2500-4200 м/с (интервал глубин до 10-12 м). Ниже по

разрезу (до глубин 30-40 м) значения скорости продольной волны изменялись в диапазоне 3300-5600 м/с. Столь значительный разброс значений скоростей продольной волны и относительно невысокие величины для габбро и амфиболитов свидетельствует в первом приближении о высокой степени выветрелости и трещиноватости массива пород.

Сложность структурно-тектонического строения массива пород, субвертикальная трещиноватость и такая же структурная форма массива, а также высокая степень и неоднородность выветривания оказывают большое влияние на формирование волнового поля межскважинного сейсмопросвечивания. Полученные сейсмограммы просвечивания имеют достаточно сложную интерференционную структуру волнового поля. Выделить и проследить на сейсмограммах сейсмопросвечивания поперечную волну, параметры которой необходимы для оценки упруго-деформационных и прочностных свойств массива, даже после обработки различными процедурами фильтрации практически невозможно. Поэтому основная томографическая обработка и интерпретация полученного материала проводились по прямой продольной волне, выделение которой по динамическим признакам не представляло каких-либо затруднений. В тоже время необходимо отметить некоторые особенности динамики прямой волны, которые могут качественно характеризовать состояние и строение массива пород. Инверсия фаз прямой волны, наблюдаемая в отдельных интервалах глубин волновых полей, смена частотного состава и поглощение амплитуды волны, все это свидетельствует в первом приближении о неоднородности физических свойств массива пород. Особенно это ярко выражено по смене частотного спектра прямой волны. Как правило, на всех волновых полях в нижнем интервале глубин прямая волна характеризуется диапазоном частот 800-1100 Гц. В средних интервалах частотный спектр снижается до 600-700 Гц. В самой верхней части (в интервале глубин до 15-16 м), а также в ряде интервалов средней части наблюдается резкое уменьшение, как амплитуды сигнала, так и частоты, которая не превышает 300 Гц.

Результаты томографической обработки межскважинного сейсмопросвечивания представлены заказчику в виде сейсмотомографических разрезов (вертикальных карт значения скоростей продолжительных волн) межскважинного пространства и сечений в плане (горизонтальные карты скоростей) на различных глубинных отметках с дискретностью по глубине 5 м (рис. 1). Анализ полученных сесмотомографических разрезов показывает следующие особенности строения массива исследований.

Скорость продольной волны в исследуемых глубинах массива пород изменяется в диапазоне 2400-5200 м/с. В целом такой диапазон изменения значений скорости продольной волны соответствует диапазону скоростей, определенному по результатам ультразвукового просвечивания керна площадки башни «Исеть». Однако утверждать о плавном, градиентном увеличении значений скорости продольной волны с глубиной нельзя. Скоростная модель массива исследований, судя по сейсмотомографическим разрезам, имеет явно неоднородное строение, как в плане участка, так и по глубине. Наименьшими значениями скорости (Vp = 2400-2800 м/с) характеризуется верхняя часть геологического разреза в интервале глубин до 14-16 м. По значениям скоростей продольной волны этот интервал глубин разреза соответствует в большей мере обло-

мочным породам, которые были образованы в результате сильного физического выветривания пород скального типа.

При преобладающих значениях скоростей 2600-2800 м/с на отдельных участках массива в этом интервале глубин наблюдаются также и зоны с повышенными значениями скорости (до 4500 м/с). Это свидетельствует о том, что процесс выветривания на площадке исследований происходил очень неравномерно.

Неоднородность процессов выветривания массива прослеживается по значениям скоростей продольной волны и их характеру распределения в объеме исследований и на больших глубинах. Наиболее крупные зоны пониженных значений скоростей соответствующие более разуплотненным, трещиноватым, выветрелым участкам массива (карманы выветривания) наблюдается в околоскважинных пространствах скважин 05 и 01. На волновых полях сейсмопросвечивания это отображается низкочастотным спектром прямой волны (300-400 Гц), инверсией фазы.

В околоскважинном пространстве скважины 05 глубина кармана выветривания достигает 30 м и более, а в плане имеет развитие за пределы участка исследований в северо-западном направлении на большие глубины. Породы в карманах выветривания, представленные песком и обломочным материалом, характеризуются наименьшими значениями скорости продольной волны (Vp = 2400-2800 м/с). Аналогичными породами и значениями скорости характеризуется и карман выветривания в околоскважинном пространстве скважины 01, однако его размеры, как в плане, так и по глубине имеют меньшие размеры.

Невысокими значениями скорости продольной волны (Vp=3000-3500 м/с)

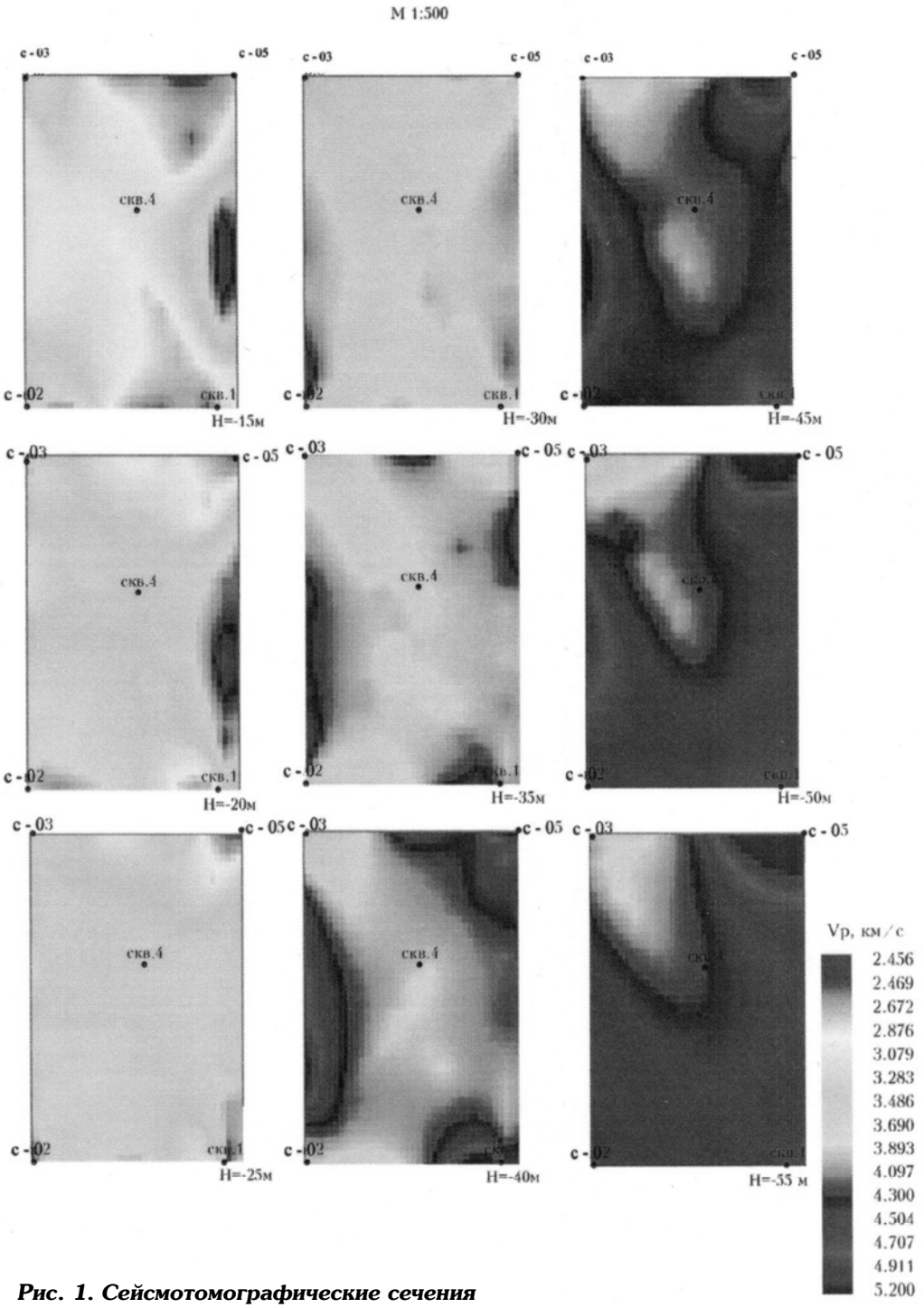


Рис. 1. Сейсмотомографические сечения

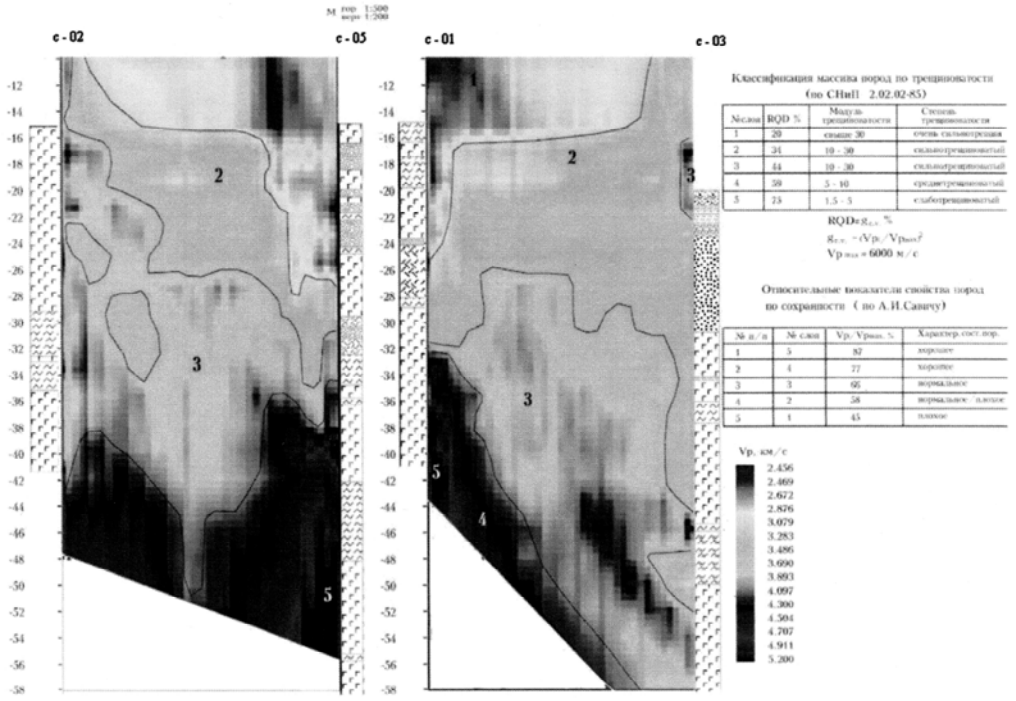


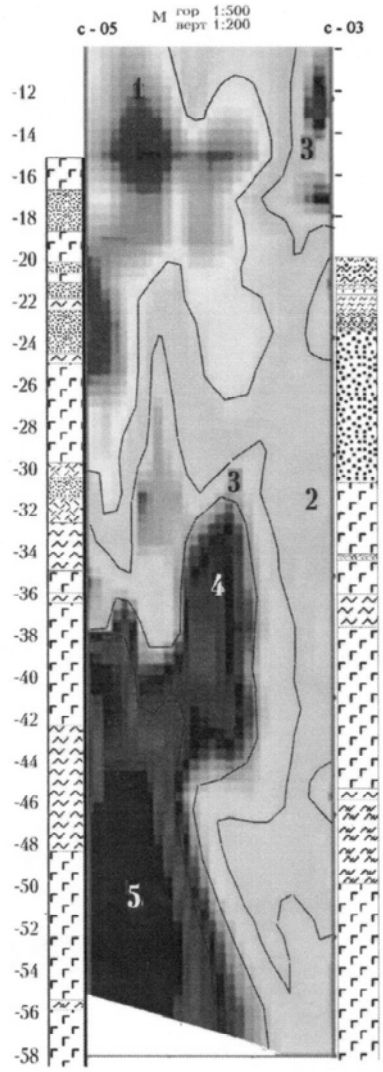
Рис. 2. Сейсмотомографические разрезы

характеризуется околоскважинное пространство скважины 03. Зона пониженных значений скоростей, соответствующая сильнотрещиноватым и выветрелым породам в околоскважинном пространстве скважины 03 прослеживается практически по всей глубине исследований и вероятно имеет продолжение и на больших глубинах. О вероятности развития зоны в подзабойной части оклоскважинного пространства свидетельствуют следующие скоростные признаки. Во-первых, непосредственно в пределах забоя скважины 03 отмечается зона невысоких значений скоростей 3600-3800 м/с, которая имеет тенденцию развития в субмеридиональном направлении.

Во-вторых, в центральной части массива вблизи скважины 04 на сейсмотомографическом разрезе между скважинами 02 – 05 наблюдается узкая зона пониженных значений скоростей 3800-4000 м/с, которая по данным акустического каротажа скважины прослеживается до глубины 76 м. По сейсмотомографическому разрезу межскважинного пространства скважин 01 – 03 и сечениям в плане, эта зона смещается по глубине и расширяется в плане в субмеридиональном направлении в сторону скважины 03.

Аналогичного характера зоны пониженных значений скоростей, но мельче по размерам, прослеживаются и внутри массива на различных глубинах. Наибольшую по размерам среди них можно отметить зону, примыкающую к скважине 02 с запада в интервале глубин 24-41 м.

В структурно-тектоническом плане массив имеет блоковое строение. По форме скоростных зон в изучаемом



Классификация массива пород по трещиноватости
(по СНиП 2.02.02-85)

№слоя	RQD %	Модуль трещиноватости	Степень трещиноватости
1	20	свыше 30	очень сильнотрещиноватый
2	34	10 - 30	сильнотрещиноватый
3	44	10 - 30	сильнотрещиноватый
4	59	5 - 10	среднетрещиноватый
5	75	1.5 - 5	слаботрещиноватый

$RQD = g_{c.v.}$ %

$g_{c.v.} = (Vp_i / Vp_{max})^2$

$Vp_{max} \approx 6000$ м/с

Относительные показатели свойства пород
по сохранности (по А.И.Савичу)

№ п/п	№ слоя	Vp/Vp_{max}, %	Характеристика состояния породы
1	5	87	хорошее
2	4	77	хорошее
3	3	66	нормальное
4	2	58	нормальное / плохое
5	1	45	плохое

Vp, км/с

2.456
2.469
2.672
2.876
3.079
3.283
3.486
3.690
3.893
4.097
4.300
4.504
4.707
4.911
5.200

Рис. 3. Сейсмографический разрез по скважинам 03 и 05

массиве преобладают субвертикальные структурные формы. Наблюдаемые в ряде интервалов разреза субгоризонтальные формы имеют подчиненное значение. Рассматривая объемное сейсмотомографическое изображение массива пород (граф. приложение 1.5), видно, что габбровый массив пород, для которого характерны повышенные значения скорости продольной волны внедряется на площади исследований с запада. Судя по характеру сейсмотомографических разрезов, относительно крупные структур (блоки) осложнены различной степени субвертикальной трещиноватостью. Средний угол падения структурных элементов и соответственно трещиноватости составляет 75°. Элементы простирания трещиноватости по выполненному объему

исследований точно определить достаточно сложно, однако, судя по преобладающей вытянутости скоростных зон на сейсмотомографических сечениях в плане и характеру объемного сейсмотомографического изображения, простирание трещиноватости (тектонической нарушенности) имеет направление северо-запад – юго-восток.

Анализ скоростной модели массива пород показывает очень слабую корреляцию изменения значений скорости продольной волны с литологическим составом пород. Например, для габбро значения скорости могут быть, как 3500 м/с, так и 5200 м/с. То есть, сейсмотомографические разрезы по значениям скоростей продольной волны в большей степени отображают физическое состояние массива пород, степень его сохранности.

Таким образом, по результатам проведенных геофизических исследований методом скважинной сейсмической томографии и ВСП на основе геоинформационной системы было изучено физическое состояние массива пород площадки строительства высотной башни «Урал» Делового центра «Екатеринбург-Сити», оценено его структурно-тектоническое строение.

Оценены упруго-деформационные и прочностные свойства пород, даны их квалификационные характеристики. Определена степень выветрелости и трещиноватости массива пород.

В структурно-тектоническом плане массив пород имеет блоковое и мелкоблочное строение, осложненное трещиноватостью и слоистостью пород. Блоки имеют субвертикальное строение. Преобладает субвертикальная слоисточть и трещиноватость пород (средний угол падения - 75°). Блочность строения массива пород обусловлена общей тектоникой массива и последующими особенностями процесса выветривания.

Верхняя часть массива до глубин 15-16 м характеризуется сильновыветрелым состоянием пород с очень низкими упруго-деформационными и прочностными свойствами. В целом массив пород характеризуется как выветрелый и слабовыветрелый. Развитие выветрелости по массиву неоднородно, как в плане, так и по глубине. В массиве отмечаются «карманы» выветривания, прослеживаемые на больших глубинах (до 75 м в центральной части по данным АК). Породы, слагающие карманы выветривания характеризуются относительно невысокими упруго-деформационными и прочностными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мухаметшин А. М., Болгаров А. Г.* Сейсмотомографические исследования и методика выполнения работ на площадке высотного строительства // ГИАБ. – 2008. – №4.– С. 61-65. ГИАБ

Коротко об авторах

Мухаметшин А.М. – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоинформатики УГГУ, научный руководитель ООО «АМиК - Инновационные технологии», amik@k66.ru

Болгаров А.Г. – Уральский государственный технический университет (УПИ).