

В. И. Кашкевич, Н. Н. Блохин, А. А. Анисимов, М. П. Кашкевич,
Н. И. Платонова, М. В. Шитов

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

В последние годы для решения инженерно-геологических, гидрологических, экологических и других задач, требующих применения неразрушающих технологий и обеспечивающих высокую детальность исследований, все чаще применяются сейсмические методы разведки с последующей томографической обработкой результатов. Сейсмотомографические построения позволяют получать трехмерное изображение среды, с большой точностью выделять локальные неоднородности, отличающиеся скоростными характеристиками от вмещающей среды, определять их геометрию и пространственное положение, а в некоторых случаях и внутреннее строение. Метод неоднократно и успешно применялся авторами для решения таких задач, как выявление ослабленных зон трещиноватости и участков размыва по бортам плотин гидроэлектростанций, под промышленными и жилыми объектами (Плярвинская ГЭС, Эстония, Санкт-Петербургский метрополитен, Военно-морской музей), исследование прочностных свойств грунтов (морской порт, Усть-Луга), поиски карстовых полостей (Ижорское плато), а также традиционных для сейсморазведки поисково-геологических задач.

Применение сейсмической томографии для изучения археологических объектов является новым направлением, но накопленный опыт и априорные представления о внутреннем строении исследуемых объектов явились основанием для опробования этого метода.

В сентябре 2003 г. в Новгородской области на одном из крупнейших в Европе древних захоронений Передольского погоста — кургане Шум-Гора — были проведены сейсмические работы. Именно на Шум-Гору как на объект первых опытно-методических работ выбор пал не случайно. Во-первых, по результатам ранее проведенных в этом районе археологических раскопок была составлена физико-геологическая модель сопки. Предполагалось, что тело кургана (вмещающая среда) представлено в основном рыхлым мелкозернистым сухим песком, скорости распространения упругих колебаний (v_p) в котором составляют от 0.2–0.5 км/с. По периметру и во внутренних частях сопки ожидалось скопление различных по форме и размеру валунов, представленных гранитами, диабазами или известняками, которые по скоростным характеристикам ($v_p = 2–5$ км/с) резко отличаются от вмещающей среды. Не исключалось и присутствие пустот и полостей, заполненных рыхлым низкоскоростным материалом, отличным от песка.

Во-вторых, уже первые сейсмические записи показали, что длина продольных волн, распространяющихся от источника к приемнику, составляет первые метры, подтвердив тем самым возможность выделения скоростных неоднородностей размером около 1 м.

В-третьих, линейные размеры Шум-Горы таковы (рис. 1), что упругие колебания,

возбуждаемые с одной стороны кургана, уверенно регистрировались с противоположной, позволяя тем самым проводить наблюдения практически в любой плоскости.

Методика сейсморазведочных работ

На первом этапе работ наиболее детально было решено исследовать верхний участок Шум-Горы, расположенный выше террасы. Именно поэтому в указанной части кургана пункты приема устанавливались с максимально возможной плотностью. Взаимно перпендикулярные профили № 1 и 2 северо-восточного и северо-западного направлений пересекались (см. рис. 1) на вершине сопки в точке, принятой нами за условный нуль. Пункты приема, общее число которых составляло 24 (по 12 на каждом профиле), располагались через 2 м. Система из двух других профилей западного и северного направлений (№ 3 и 4) была развернута на 45° относительно первых двух. Расстояние между сейсмоприемниками на профилях № 3 и 4 было увеличено до 5 м, с тем чтобы крайние пункты приема располагались как можно ближе к основанию сопки. Первая расстановка (профили № 1 и 2) обеспечивала максимальное пересечение лучевых траекторий в верхней части кургана (выше террасы), вторая — более длинные профили № 3 и 4 — охватывала также краевые части кургана, с тем чтобы впоследствии определить скоростные характеристики среды на нижнем уровне.

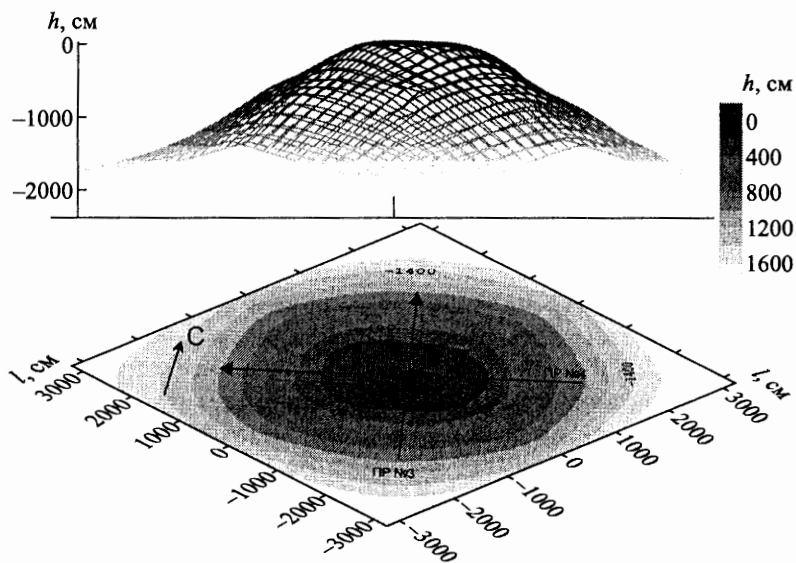


Рис. 1. Рельеф Шум-Горы и схема расположения сейсмических профилей.

Источник упругих колебаний, роль которого выполняла 8-килограммовая кувалда, перемещали по линиям профилей с шагом 2 м (для профилей № 1 и 2) и 5 м (для профилей № 3 и 4) с выносом за первый и последний пункты приема на 20 м. Упругие колебания, создаваемые источником в каждой точке возбуждения, одновременно принимались сейсмоприемниками, расположенными на двух профилях: на профиле по которому перемещался источник, и на перпендикулярной к нему линии приема. Пс

такой же схеме проводились работы и после разворота профилей на 45° и увеличения шага между точками приема до 5 м. Такая расстановка позволила получить лучевую схему (рис. 2), пригодную для построения объемной скоростной модели заданного объема.

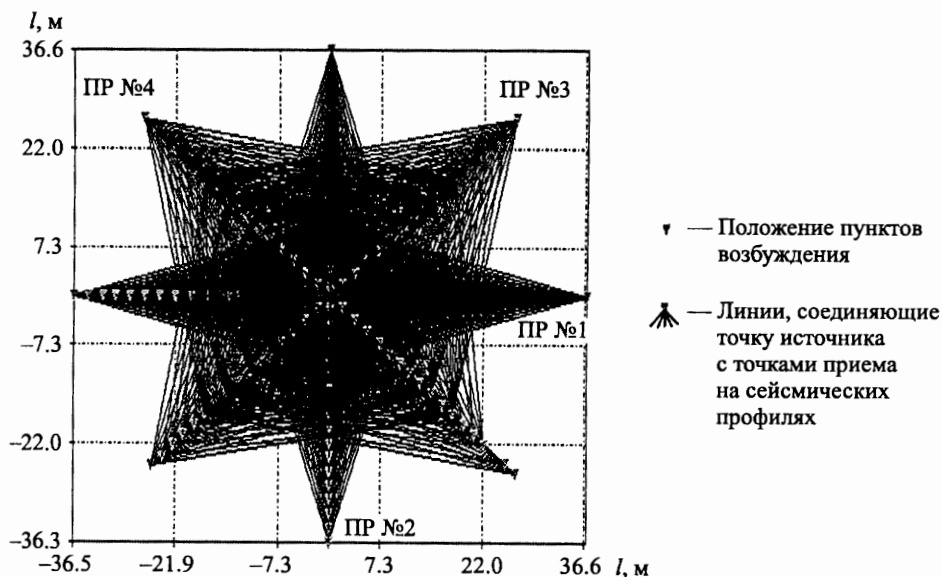


Рис. 2. Лучевая схема (вид сверху).

Для улучшения отношения сигнал–помеха использовались группы из трех сейсмоприемников на пикет и накопления сейсмического сигнала. Для большей помехоустойчивости каждая группа сейсмоприемников устанавливалась в предварительно вырытые лунки и прикрывалась сверху слоем дерна.

В качестве чувствительных элементов применялись сейсмоприемники GS-20DX производства СП «ОУО-Геоимпульс». Регистрация возбуждаемых колебаний велась с использованием инженерной 24-канальной сеймостанции «Диоген-24-12». Длина записи составляла 1024 отсчета, шаг дискретизации по времени — 0.25 мс.

Обязательным условием при проведении наземных геофизических работ является учет рельефа. Для этого по линиям профилей была проведена нивелирная съемка участка, результаты которой приведены на рис. 1.

Полевые материалы

Пример полученной волновой картины представлен на рис. 3. Целевая волна (проходящая продольная Р-волна, времена прихода которой использовались при томографической обработке) отчетливо фиксируется на всех каналах. Хорошее качество данных позволяет с большой точностью (0.25 мс) определить времена вступления этой волны.

Видимая частота продольной волны $f = 150 - 170$ Гц. При скоростях около 0.5 км/с длина волны составляет 5 м. Из результатов полевых работ и лабораторного физиче-

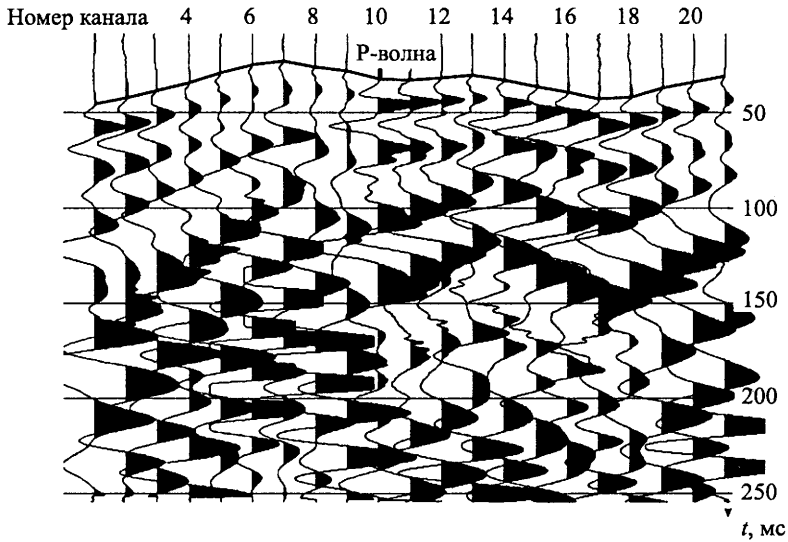


Рис. 3. Пример полевой сейсмограммы.

ского моделирования известно, что в волновых полях могут проявляться объекты с размерами, соизмеримыми с четвертью длины волны, в нашем случае — это объекты с размерами больше 1 м.

Наряду с продольной волной на волновых картинах можно проследить другие типы волн, например, проходящую поперечную S-волну. В данном случае определение времен вступления поперечной волны представляет собой довольно сложную задачу, но при соответствующей обработке полевых материалов это вполне возможно, а значит, возможно и использование этой волны в сейсмотомографической обработке для извлечения дополнительной информации.

Обработка данных

Процесс томографической обработки представлял собой итеративное чередование решений прямой и обратной задач, в ходе которого вычислялись траектории лучей и уточнялась априорная начальная скоростная модель. Итеративный процесс прерывался после того, как распределение текущей скорости более не изменялось или была достигнута заданная точность подбора расчетного и экспериментального полей времен.

Обработка материалов просвечивания кургана была проведена с использованием программы Dogstomo (П. Г. Дитмар, Ю. С. Рослов). В основе программы лежит алгоритм, разработанный для поиска решения задачи лучевой сейсмической томографии, предполагающей гладкость искомой функции [1]. В качестве априорной модели была выбрана однородная скоростная модель со средней скоростью 0.5 км/с, скомпонованная из кубических ячеек с линейным размером грани 2.3 м. Размер ячейки определялся плотностью лучевой информации в изучаемой модели и превышал минимально допустимые линейные размеры неоднородности при данной длине волны.

Общее число ячеек априорной скоростной модели 6875 шт., т. е. $(25 \times 25 \times 11)$ соответ-

ственно по осям X , Y и Z , при этом число ячеек, пересеченных лучевыми траекториями и непосредственно принимавших участие в решении прямой и обратной кинематической задач, было меньше и составило 2750 шт. (40% от общего числа ячеек). Лучевая схема эксперимента содержала 3298 лучей, следовательно, объем исходных данных (пар источник–приемник с известным временем пробега волны) и искомым параметром модели (элементарных объемов среды, в которых определялась скорость распространения сейсмической волны) был сбалансирован.

Относительная среднеквадратическая невязка, вычисленная для финальной модели, между наблюдаемыми (в результате физического эксперимента) и вычисленными (после решения обратной кинематической задачи) временами пробега волн составила 3.23%. При пересчете в скоростные характеристики среды это значение в среднем равнялось ± 0.05 км/с.

Интерпретация результатов

Полученная в результате томографической обработки сейсмических материалов трехмерная скоростная модель, представленная на рис. 4, позволяет получать вертикальные и горизонтальные сечения, что дает возможность детального послойного изучения внутреннего строения объекта.

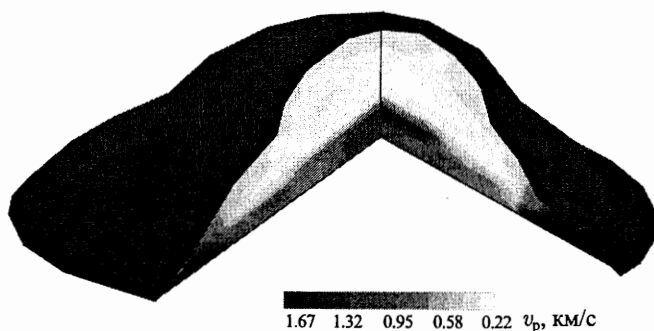


Рис. 4. Объемная скоростная модель Шум-Горы.

На вертикальных скоростных разрезах (рис. 5), построенных по линиям профилей №3 и 4, видно, что тело кургана можно условно разделить на две части: верхняя — от вершины (условного нуля) до глубины примерно 12 м — представлена рыхлым низкоскоростным материалом со средними скоростями $v_p = 0.25-0.30$ км/с, нижняя, мощностью около 4 м, представлена более плотными высокоскоростными породами со скоростями около 0.6 км/с.

В нижнем ярусе в центре четко прослеживаются области аномально высоких скоростей с $v_p = 1.0-1.5$ км/с, вызванные, вероятнее всего, скоплением валунов. Это предположение не противоречит существующим представлениям о внутреннем строении древних захоронений. Пониженные значения скоростей (по сравнению со скоростями продольных волн в магматических горных породах и известняках) вызваны, по-видимому, тем, что промежутки между отдельными валунами небольшого размера заняты низкоскоростным рыхлым материалом, возможно песком, вследствие чего отсутствует жесткий контакт между высокоскоростными включениями. Кроме того, валунный материал в

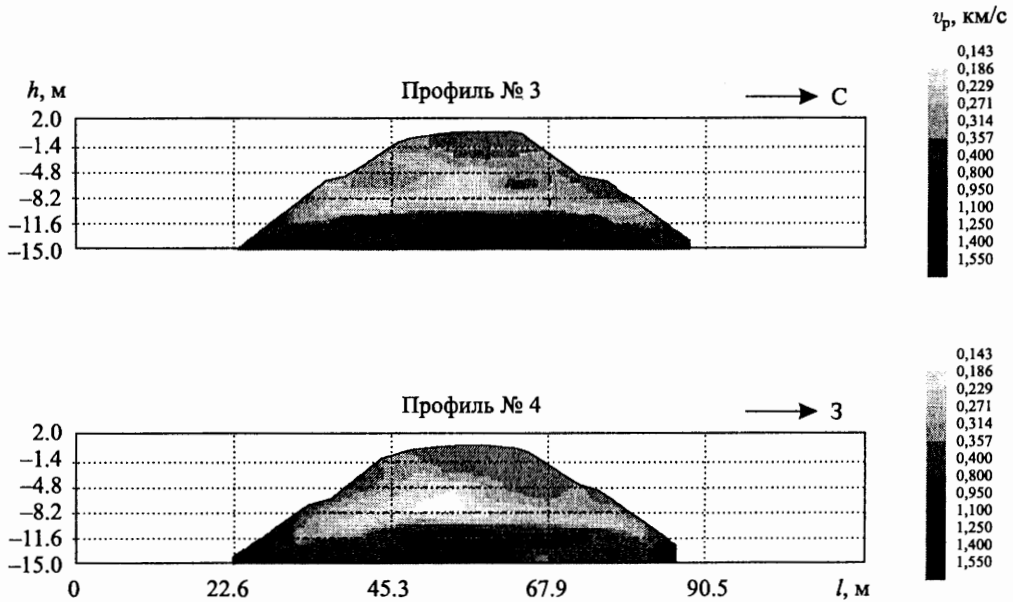


Рис. 5. Вертикальные разрезы вдоль профилей № 3 и 4.

течение длительного времени находился в условиях сезонного изменения температуры и влажности, что могло привести к образованию трещиноватости и, как следствие, вызвать уменьшение скорости. Еще одной причиной является осреднение значений скорости по всей элементарной ячейке ($2.3 \times 2.3 \times 2.3$ м) при том, что объемное содержание высокоскоростных включений может составлять лишь первые десятки процентов.

В верхнем ярусе на приведенных вертикальных разрезах в центральной части четко выделяется область пониженных скоростей, где скорость распространения упругих колебаний уменьшается до 0.2 км/с. Верхняя граница низкоскоростной области находится примерно на 5–6 м ниже вершины холма (условного нуля). В вертикальной плоскости область имеет неправильную трапециевидную форму, увеличиваясь в размерах от 2–3 м в верхней части до 8–10 м на глубине 12 м, и расположена непосредственно над центральной высокоскоростной аномальной зоной нижнего яруса. Заслуживает внимания тот факт, что границы низкоскоростной области «размыты». Это указывает не на резкое изменение скорости, как в случае с высокоскоростными зонами нижнего яруса, а на постепенное уменьшение ее значений к центру кургана. Можно предположить, что центральная часть Шум-Горы была выполнена из некоего материала, упругие свойства которого мало отличаются от свойств вмещающей среды (песка), а с течением времени под влиянием различных внешних факторов эта граница стала еще менее четкой и трансформировалась в переходный градиентный слой. Таким материалом вполне мог быть, например, торф.

Единственный высокоскоростной участок в верхнем ярусе, размер которого не превышает 1–1.5 м и скорость в котором возрастает до 0.4 км/с, выделяется на разрезе по линии профиля № 3. Этот же участок виден на горизонтальном сечении –5 м (рис. 6), где он с северной стороны примыкает к низкоскоростной области.

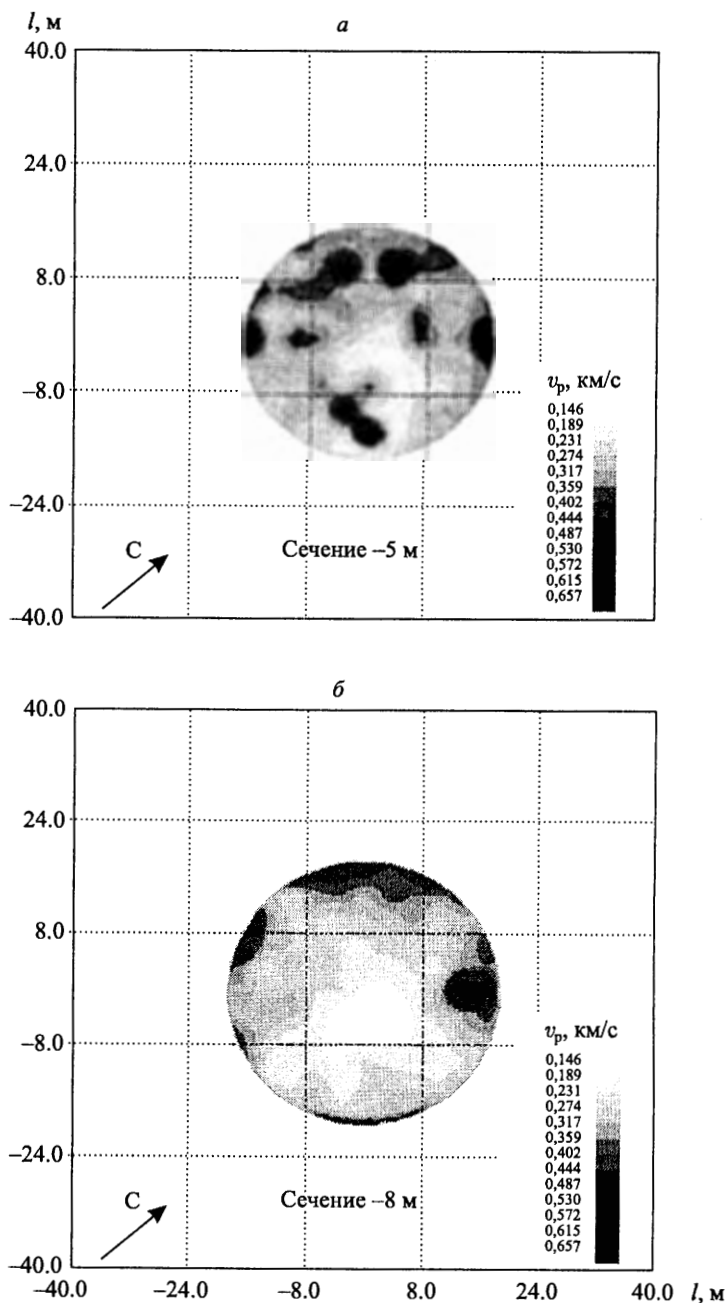


Рис. 6. Горизонтальные сечения скоростной модели на уровне -5 (а) и -8 м (б).

Горизонтальные сечения Шум-Горы (рис. 6), проходящие на уровне -5 и -8 м относительно вершины, были выбраны вследствие их наибольшей информативности. Дело в том, что выше по разрезу среда по скоростным характеристикам близка к однородной (см. вертикальные разрезы), а ниже -8 м скоростные построения в горизонтальной плоскости менее достоверны из-за малой плотности лучевых траекторий в этой области (исключением являются линии профилей, где плотность сейсмических лучей в вертикальной плоскости довольно высока).

В центре горизонтального сечения -5 м видны контуры верхней части низкоскоростной области, выделенной нами и на вертикальных разрезах. Кроме этого вокруг низкоскоростной аномалии четко выделяются, по крайней мере, шесть высокоскоростных зон размером $1.5-2$ м каждая, скорости в которых возрастают до 0.7 км/с. Уже на глубине 8 м все они за исключением наиболее интенсивной аномалии, находящейся в северо-восточной части Шум-Горы, в поле скоростей не проявляются. Центральная низкоскоростная аномалия на горизонтальном срезе -8 м, напротив, становится более значительной, увеличиваясь до $8-9$ м.

В 2002 г. на кургане Шум-Гора проводились исследования с помощью георадара «SIR System-2000» [2], в результате которых было выявлено семь аномальных зон, отличающихся от вмещающей среды либо большей, либо меньшей «отражательной способностью». Практически все они, по мнению авторов, расположены на глубине $7-15$ м от вершины кургана. В результате же сейсмических работ, как отмечалось ранее, наибольшее внимание было уделено верхней части кургана (за исключением наблюдений по профилям № 3 и 4). В следующем году планируется проведение дополнительных сейсмических работ с целью определения скоростного строения нижней части кургана. В этом случае можно будет не только сравнить результаты двух методов, но и дополнить полезной информацией окончательные выводы о строении Шум-Горы.

Выводы

Проанализировав первые результаты сейсмических исследований на Шум-Горе, можно подвести итоги:

— Шум-Гора не является объектом естественного происхождения, так как средние скоростные характеристики самого кургана и основания, на котором он стоит, значительно различаются.

— Скоростное строение кургана крайне неоднородно, скорости меняются в интервале от 0.2 до 1.6 км/с.

— В центральной части Шум-Горы находится зона пониженных скоростей. Размер ее увеличивается сверху вниз от $1.5-2$ м на уровне -5 м до $8-9$ м на уровне -8 м.

— Практически все отдельно расположенные высокоскоростные объекты размером $1-2$ м находятся на глубине от 5 до 8 м, т. е. на уровне террасы, и образуют некое подобие окружности. Одна высокоскоростная зона, находящаяся на северо-восточном склоне кургана, отличается большим (до $3-4$ м) размером и залегает несколько глубже остальных.

— В нижнем ярусе Шум-Горы четко выделяется зона аномально высоких скоростей, расположенная в центральной части точно под низкоскоростной областью верхнего яруса.

— Краевые высокоскоростные аномальные области у самого основания Шум-Горы с линейными размерами до 1–2 м на данном этапе работ нельзя считать достоверными из-за неравномерного распределения лучевых траекторий.

Методические рекомендации

— Наибольший интерес, как следует из приведенных материалов, представляет собой та часть Шум-Горы, которая находится ниже –5 м от вершины, т. е. участок, лежащий ниже террасы, так как именно здесь наблюдается наибольшая скоростная дифференциация пород.

— Для наиболее детального и достоверного изучения Шум-Горы от террасы и ниже необходимо условно разделить эту область на шесть-семь взаимно перекрывающихся секторов и последовательно проводить сейсмические работы в каждом из них с использованием площадной системы наблюдений. Это, с одной стороны, позволит обеспечить необходимую плотность сейсмических лучей, с другой — благодаря перекрытиям контролировать качество и достоверность получаемой информации.

— Необходимо расширить площадь съемки, т. е. приемными расстановками перекрыть не только область изучаемого объекта, но и выйти за его пределы, что исключит появление ложных краевых аномалий.

Первые и, несомненно, положительные результаты сейсмических исследований на Шум-Горе позволяют надеяться на успешное их продолжение не только на этом интереснейшем объекте, но и на других археологических объектах, требующих применения неразрушающих технологий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-06-80384).

Указатель литературы

1. Дитмар П. Г. Алгоритм томографической обработки сейсмических данных, предполагающий гладкость искомой функции // Изв. РАН. Физика Земли. 1993. № 1. С. 7–13.
2. Спиридонов М. А., Мануйлов С. Ф., Кропачев Ю. П. и др. Отчет о геофизических исследованиях древнего кургана Шум-Гора, выполненных сотрудниками ФГУП ВСЕГЕИ им. А. П. Карпинского, с помощью георадара «SIR System-2000». 2002. 23 с.