

Оценка возможностей применения метода сингулярного разложения для подавления случайного шума в данных ВСП

А.А. Табаков, Ю.А. Степченков, В.Н. Ференци

Введение

Проведено исследование применения метода сингулярного разложения для ослабления в сейсмических записях случайного шума. Алгоритм основан на подавлении заданного уровня наименьших сингулярных значений и соответствующих им сингулярных векторов в матрицах, составленных из амплитуд волнового поля.

Метод

Амплитуды волнового поля образуют прямоугольную матрицу M размерности $m \times n$, которая представляется в виде произведения трех матриц следующим образом:

$$M = U * S * V^T, \quad (1)$$

где U , V – квадратные матрицы левых (кросскорреляционная матрица трасс $M * M^T$, размерности m) и правых (кросскорреляционная матрица отсчетов $M^T * M$, размерности n) сингулярных векторов соответственно; S – матрица размера $m \times n$ с сингулярными значениями на главной диагонали, остальные значения матрицы S нулевые. На следующем этапе сингулярные значения в матрице S , которые меньше заданного уровня, нормированного на максимальное сингулярное значение в полученном наборе, обнуляются. При этом порог обнуляемых сингулярных значений задается не ступенчатой функцией, а гладкой весовой функцией заданной ширины. После обнуления значений в матрице S , исходная матрица амплитуд волнового поля M восстанавливается по формуле (1).

Модельный эксперимент

На рисунках 1 – 9 показаны сингулярные векторы и сингулярные значения, полученные при разложении различных модельных волновых полей, состоящих из 100 трасс длиной 100 мс с шагом дискретизации 1 мс.

Для эксперимента с применением фильтра были получены синтетические волновые поля ВСП (вертикальные компоненты) с различным уровнем белого шума. Интервал по времени составлял 500 мс, шаг дискретизации 1 мс. Расчеты проводились в ПО Юниверс (модуль Preprocessing->Wavefield editing->Spike noise reduction).

На рисунке 10 показано исходное волновое поле (А) с наложением белого шума, который по интенсивности сопоставим с полезным сигналом. После подавления шума с весовой функцией 0-0.2-0.3-1 (20% наименьших сингулярных значений обнуляется, от 20% до 30% постепенно подавляется гладким фильтром, оставшиеся 70% сингулярных значений пропускаются), формируется поле выделенных шумов (Б) и результат их вычитания из исходного волнового поля (В).

На рисунке 11 показано исходное волновое поле (А) с наложением белого шума, который по интенсивности многократно превышает полезный сигнал. После подавления шума с весовой функцией 0-0.6-0.7-1 (60% наименьших сингулярных значений обнуляется, от 60% до 70% постепенно подавляется гладким фильтром, оставшиеся 30% сингулярных значений пропускаются), формируется поле выделенных шумов (Б) и результат их вычитания из исходного волнового поля (В).

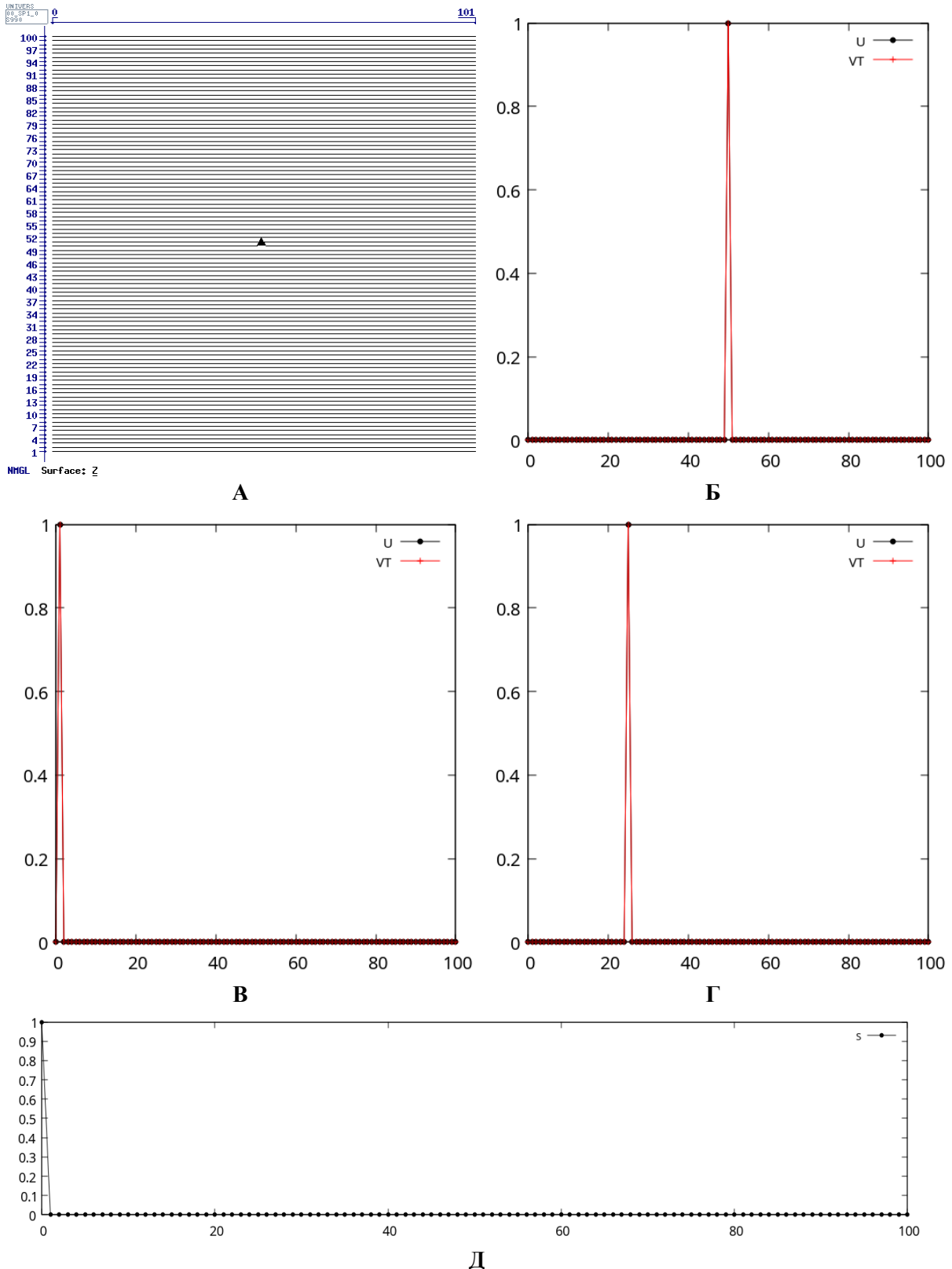


Рисунок 1. Сингулярное разложение для единичного импульса, расположенного в центре сейсмограммы. А – модельное волновое поле; Б – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для первого (максимального) сингулярного значения; В – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для второго сингулярного значения; Г – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для 25-го сингулярного значения; Д – сингулярные значения (S).

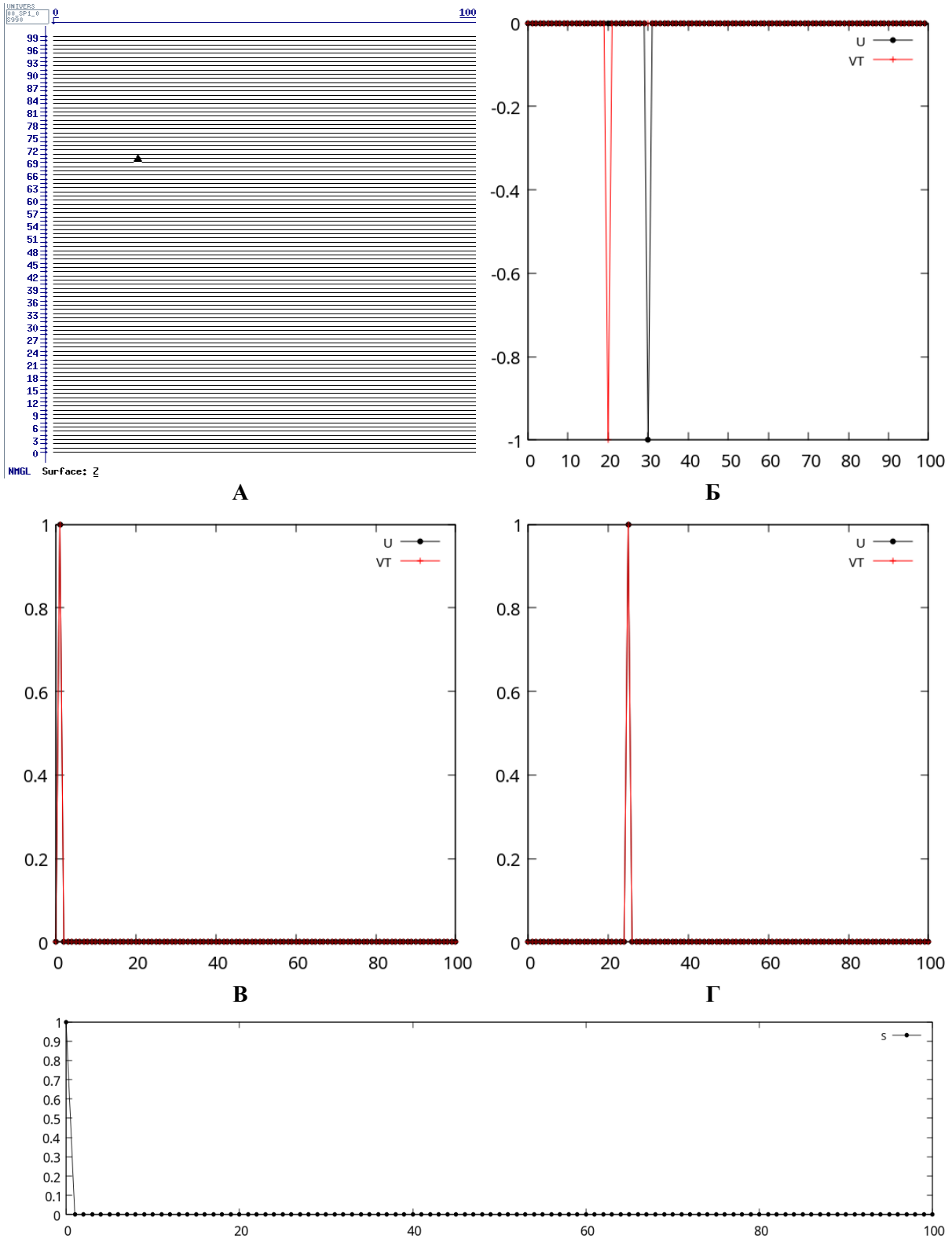


Рисунок 2. Сингулярное разложение для единичного импульса. А – модельное волновое поле; Б – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для первого (максимального) сингулярного значения; В – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для второго сингулярного значения; Г – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для 25-го сингулярного значения; Д – сингулярные значения (S).

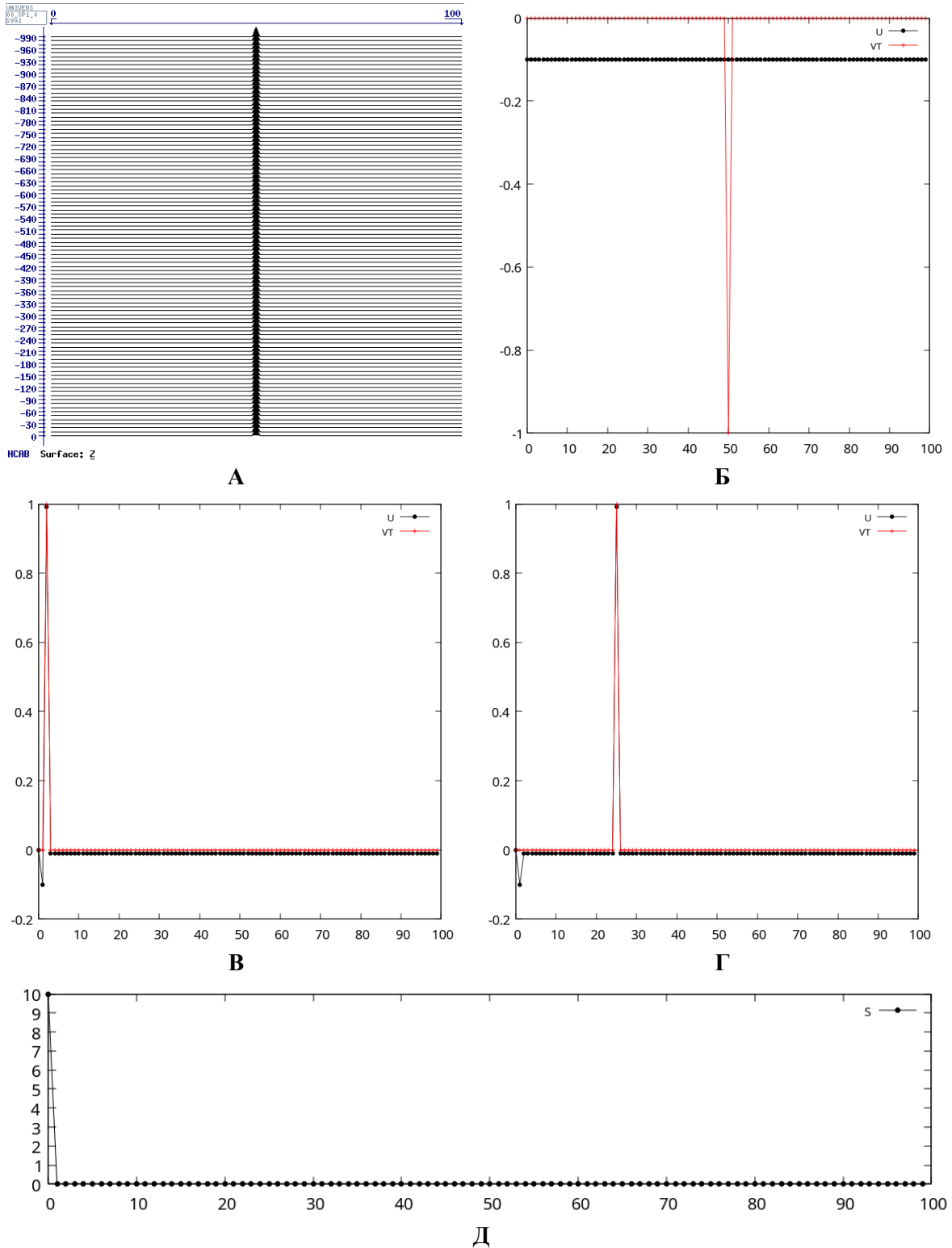


Рисунок 3. Сингулярное разложение для вертикальной волны с единичным импульсом. А – модельное волновое поле; Б – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для первого (максимального) сингулярного значения; В – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для второго сингулярного значения; Г – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для 25-го сингулярного значения; Д – сингулярные значения (S).

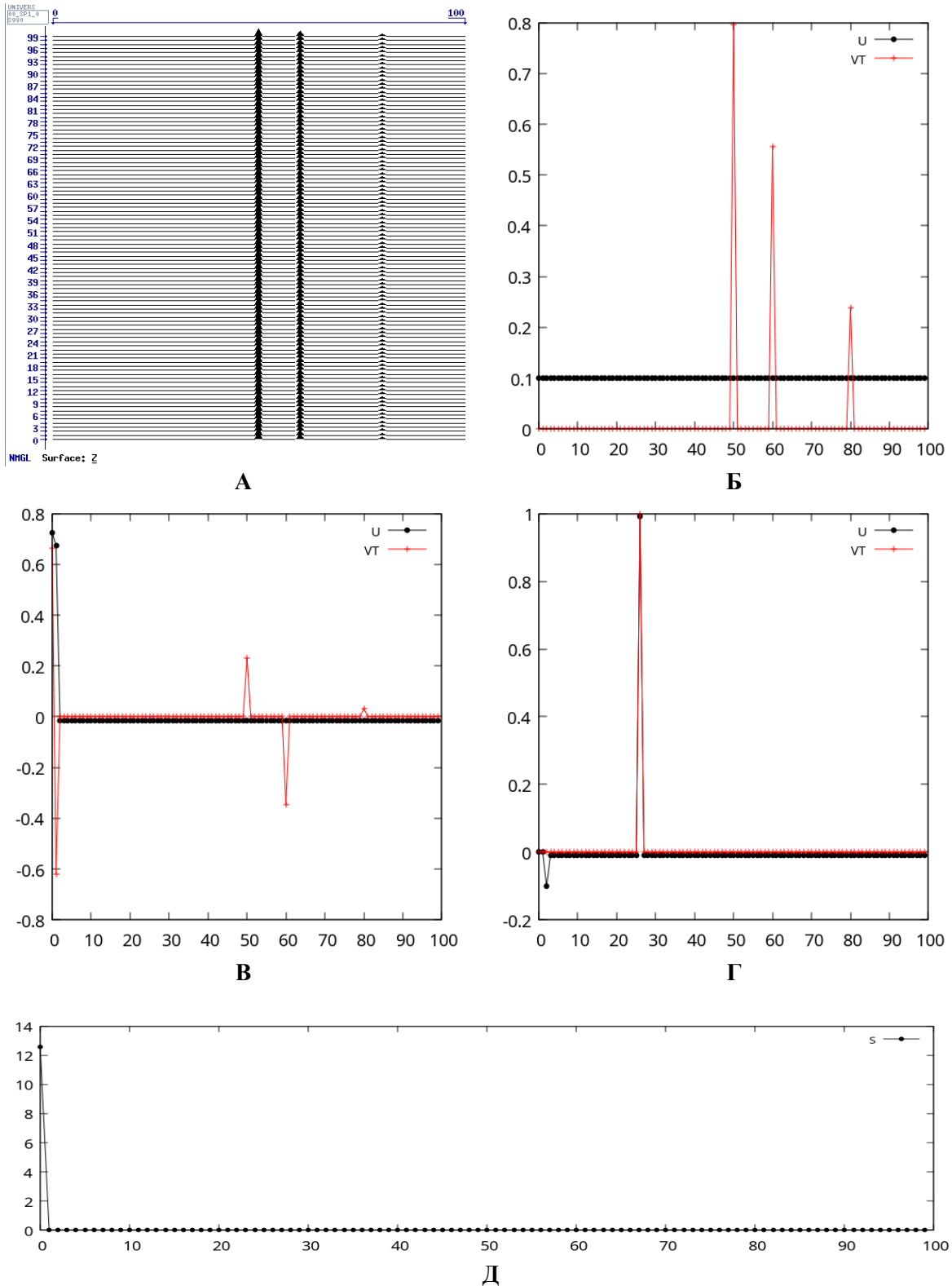


Рисунок 4. Сингулярное разложение для трех вертикальных волн с δ -импульсом различной амплитуды. А – модельное волновое поле; Б – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для первого (максимального) сингулярного значения; В – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для второго сингулярного значения; Г – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для 25-го сингулярного значения; Д – сингулярные значения (S).

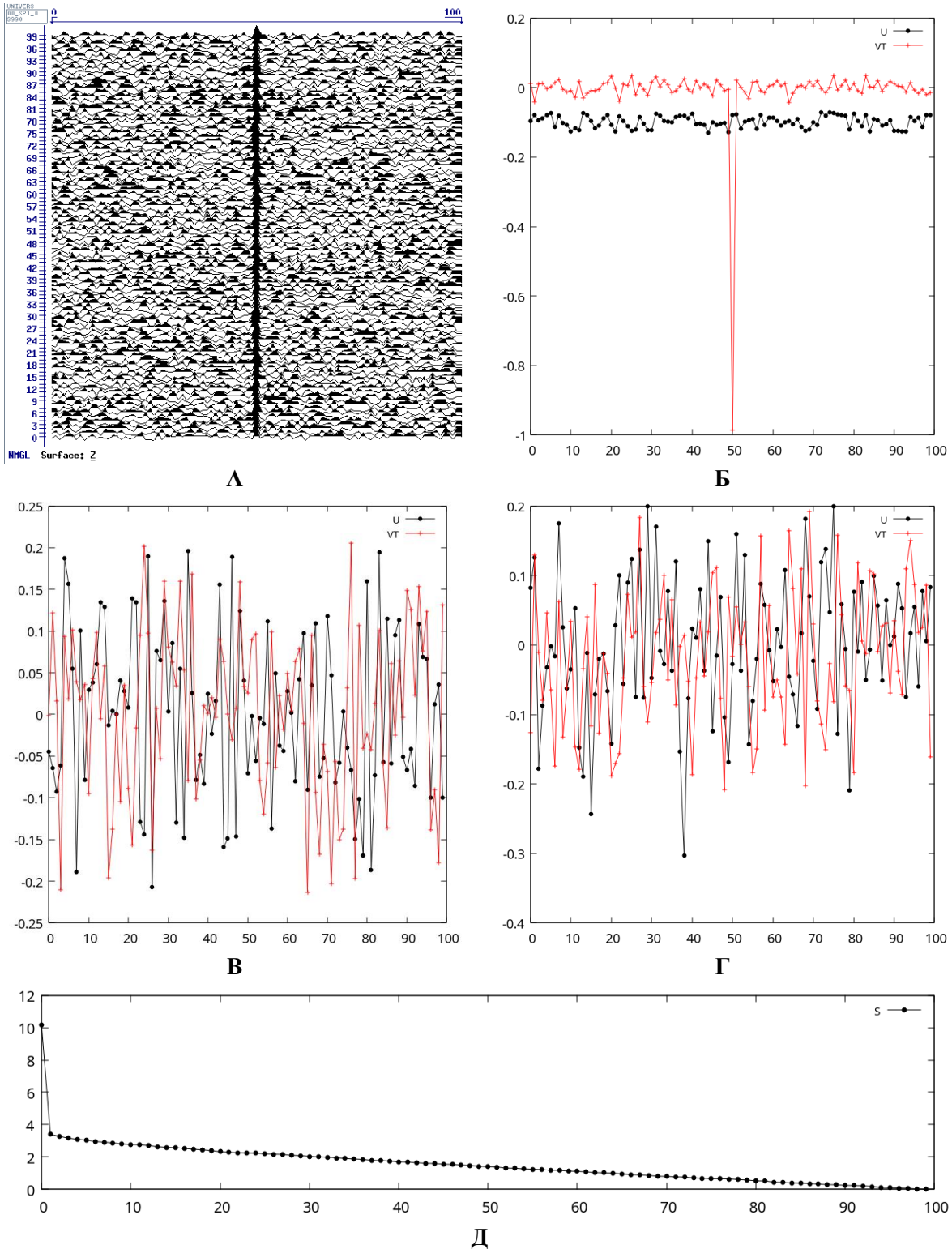


Рисунок 5. Сингулярное разложение для вертикальной волны с единичным импульсом и с добавлением 30% белого шума. А – модельное волновое поле; Б – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для первого (максимального) сингулярного значения; В – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для второго сингулярного значения; Г – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для 25-го сингулярного значения; Д – сингулярные значения (S).

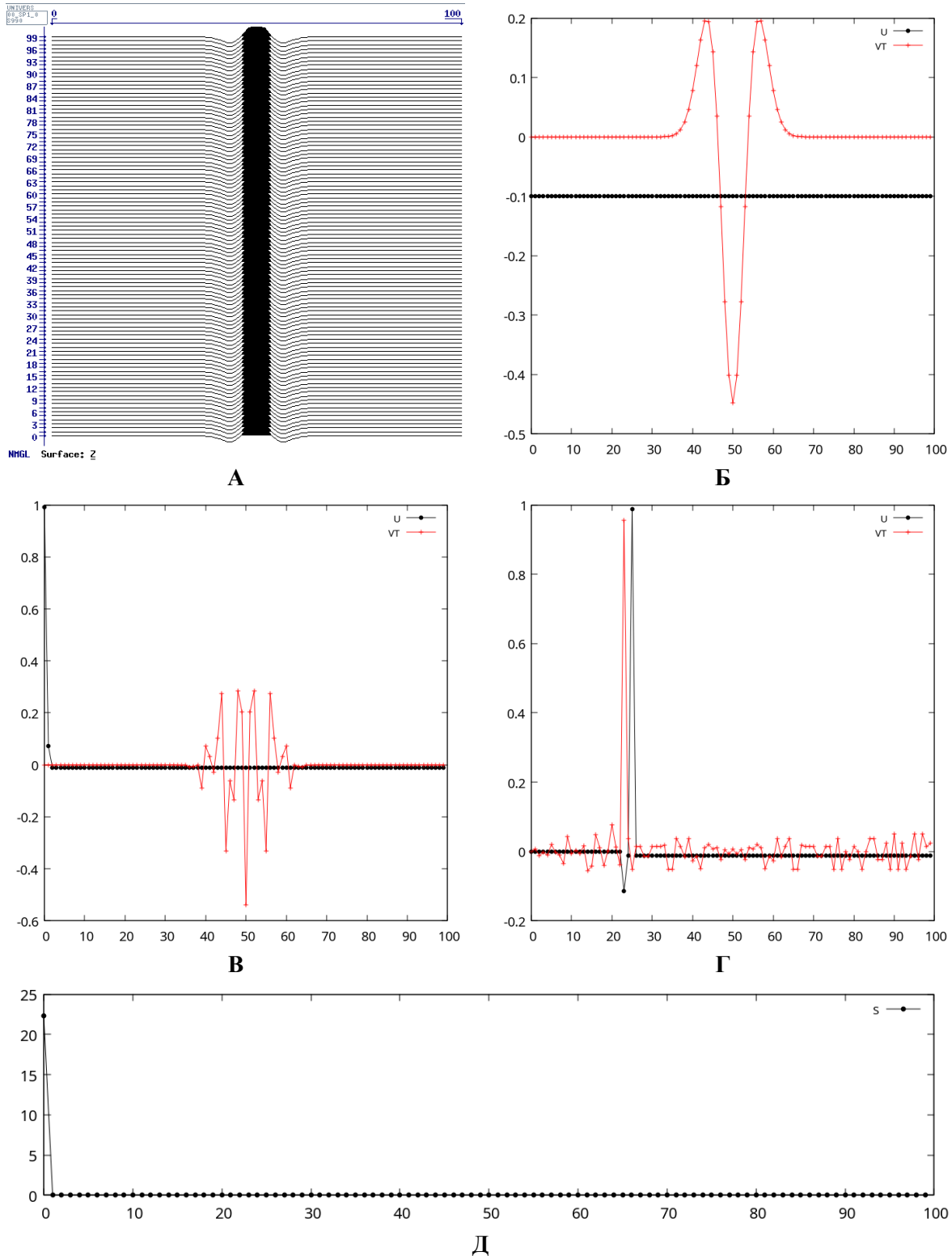


Рисунок 6. Сингулярное разложение для вертикальной волны с импульсом Рикера частотой 60 Гц. А – модельное волновое поле; Б – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для первого (максимального) сингулярного значения; В – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для второго сингулярного значения; Г – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для 25-го сингулярного значения; Д – сингулярные значения (S).

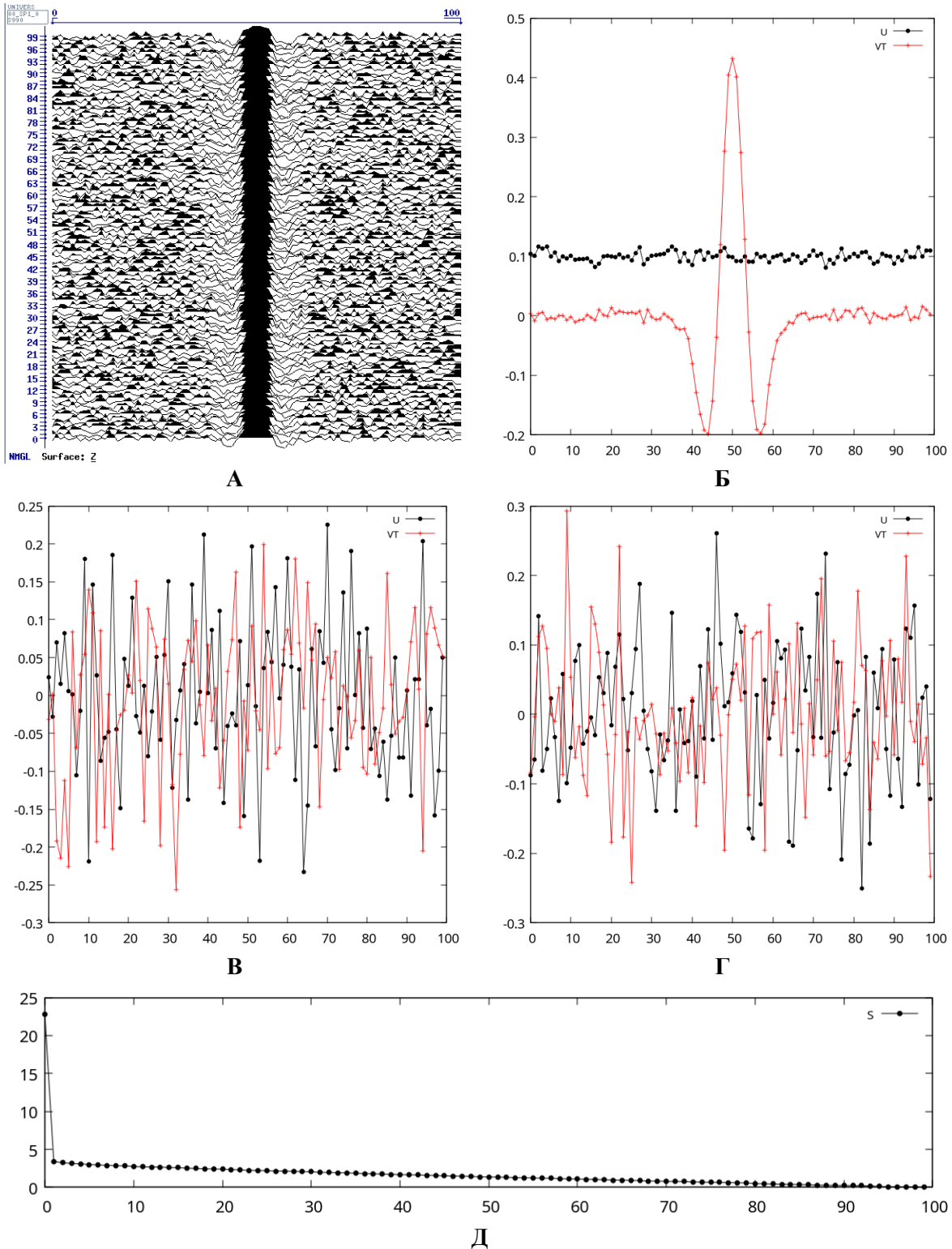
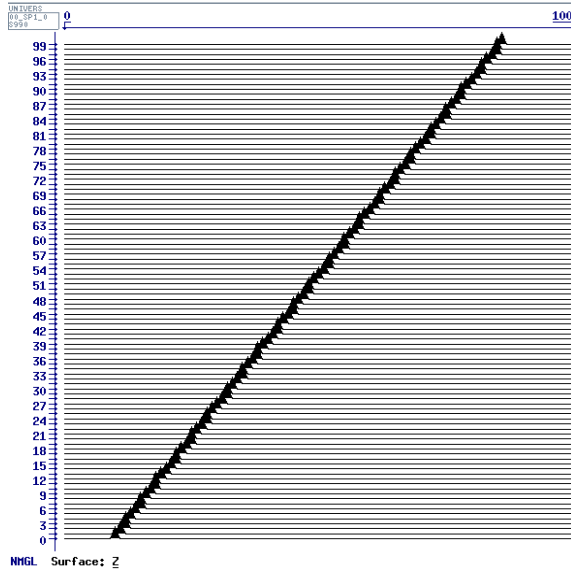
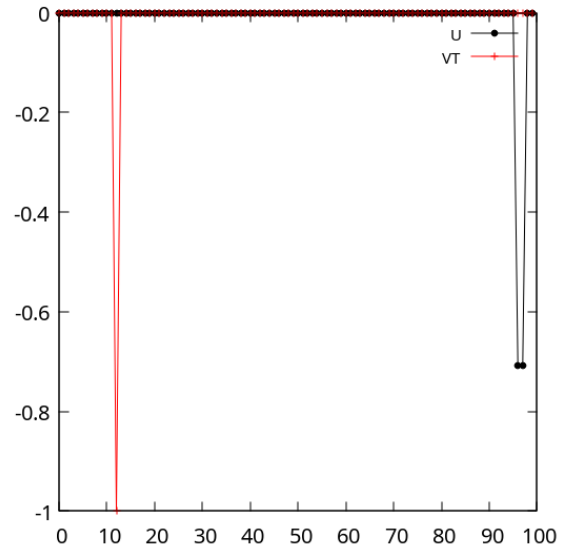


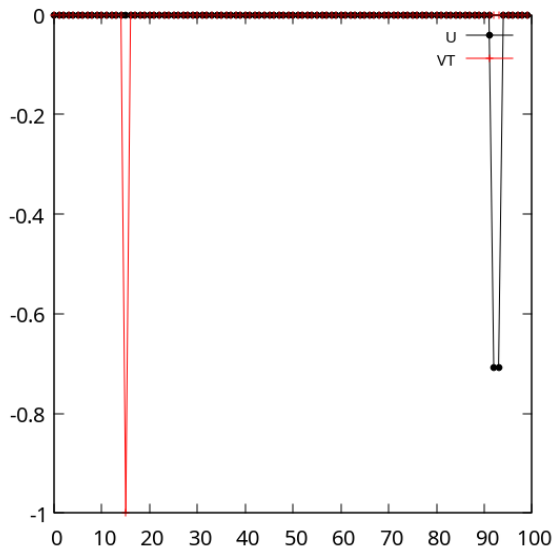
Рисунок 7. Сингулярное разложение для вертикальной волны с импульсом Рикера частотой 60 Гц и с добавлением 30% белого шума. А – модельное волновое поле; Б – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для первого (максимального) сингулярного значения; В – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для второго сингулярного значения; Г – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для 25-го сингулярного значения; Д – сингулярные значения (S).



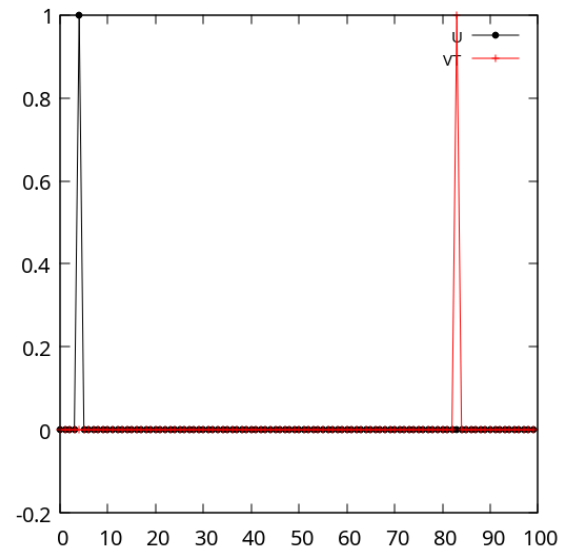
А



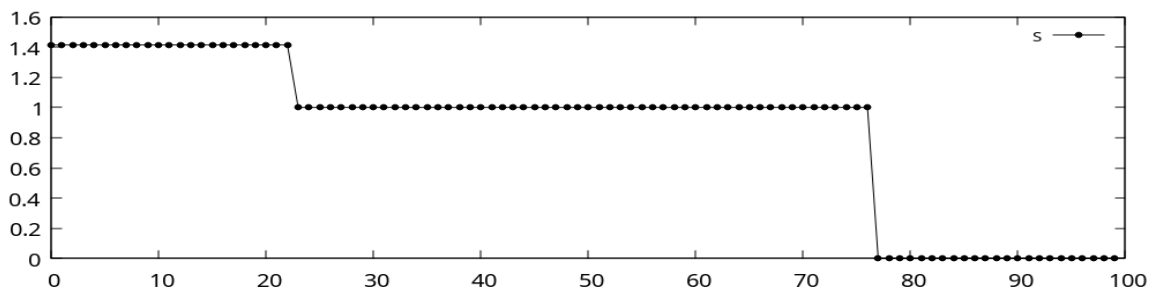
Б



В



Г



Д

Рисунок 8. Сингулярное разложение для наклонной волны с единичным импульсом. А – модельное волновое поле; Б – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для первого (максимального) сингулярного значения; В – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для второго сингулярного значения; Г – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для 25-го сингулярного значения; Д – сингулярные значения (S).

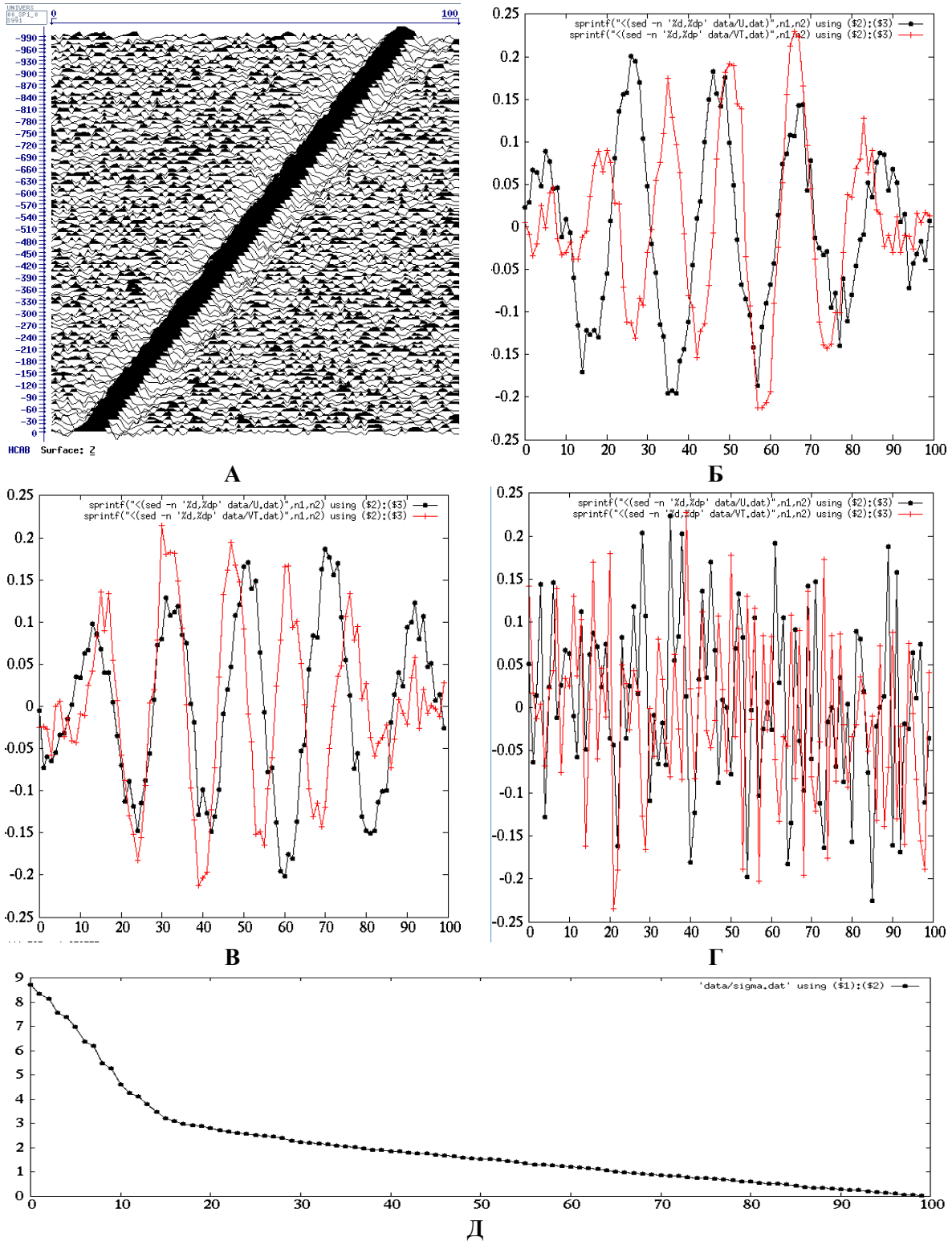


Рисунок 9. Сингулярное разложение для наклонной волны с импульсом Рикера частотой 60 Гц и с добавлением 30% белого шума. А – модельное волновое поле; Б – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для первого (максимального) сингулярного значения; В – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для второго сингулярного значения; Г – левый (U) и правый (VT) сингулярные векторы для 25-го сингулярного значения; Д – сингулярные значения (S).

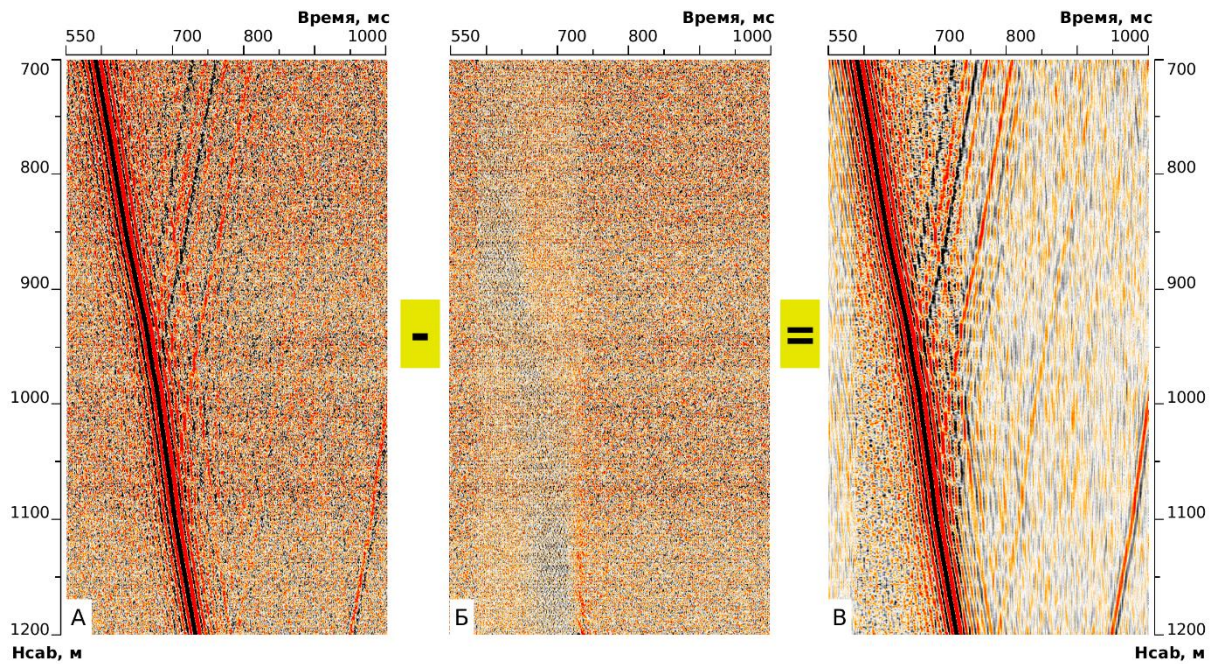


Рисунок 10. Фрагмент синтетического волнового поля ВСП (вертикальная компонента) с высоким отношением сигнала к случайному шуму. *А* – исходное поле, *Б* – выделенный случайный шум, *В* – остатки после вычитания случайного шума.

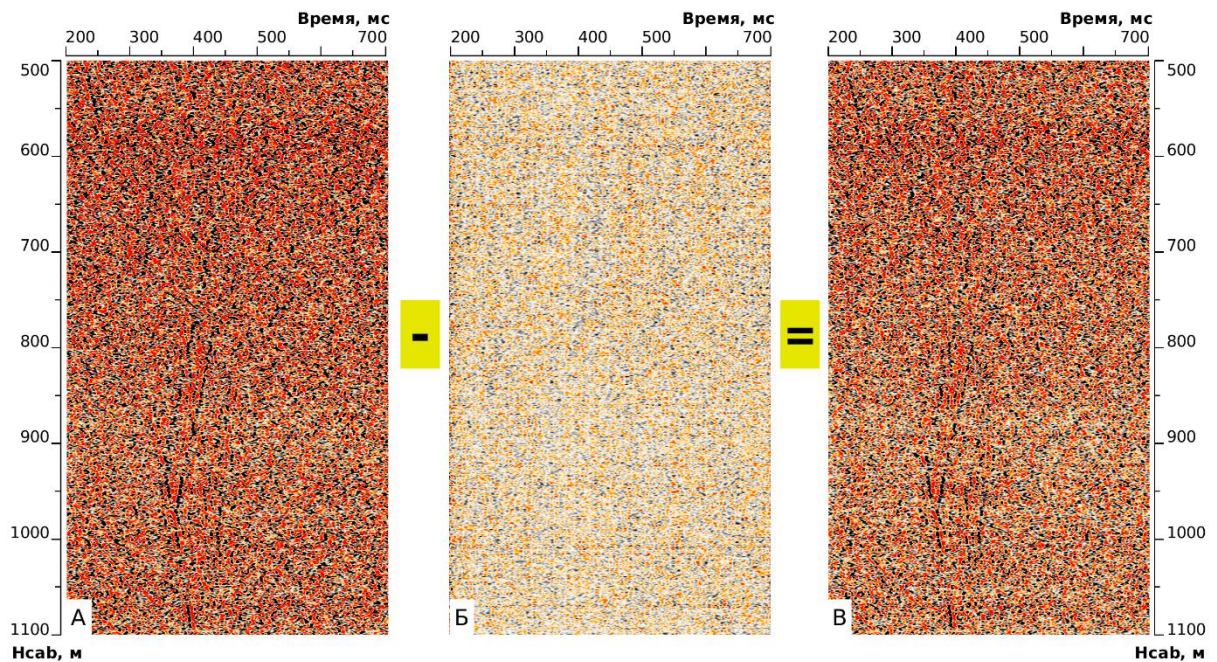


Рисунок 11. Фрагмент синтетического волнового поля ВСП (вертикальная компонента) с низким отношением сигнала к случайному шуму. *А* – исходное поле, *Б* – выделенный случайный шум, *В* – остатки после вычитания случайного шума.



Выводы

1. Существенное ослабление случайного шума методом сингулярного разложения наблюдается в случае, когда уровень интенсивности полезного сигнала сопоставим с уровнем интенсивности шума или превышает его.
2. При низком отношении полезного сигнала к шуму метод не демонстрирует значительной эффективности.

Рекомендации

1. Исследовать возможность автоматического построения весовой функции подавления сингулярных значений на основе анализа исходных данных.