

УДК 550.34

**Бубнов Евгений Яковлевич**, доцент кафедры физики, к.т.н., доцент  
e-mail: kaf\_phys@vsuwt.ru

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород,  
Россия

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПОЕЗДА В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ**

*Аннотация.* Для исследования волновой структуры сейсмического поля грузового поезда в дальней зоне использована линейная антенна, расположенная на удалении 1000 м от железнодорожной колеи. Тонкий спектральный анализ сейсмического сигнала показывает присутствие двух гармоник в диапазоне частот 1–6 Гц. Одна из дискрет совпадает по частоте с гармоникой акустического сигнала, что свидетельствует о преломлении акустической волны в твердую среду в точке расположения сейсмического датчика. Вторая дискрета сейсмического сигнала, оставаясь неизменной по частоте при движении различных составов, присутствует также в микросейсмическом шуме, что говорит о наложении слоистой структуры твердой среды на процесс распространения волны. Скорость распространения данной спектральной компоненты, измеренная фазовым способом, меньше скорости звука, что позволяет отождествить ее с поверхностной волной, формируемой слоем.

*Ключевые слова:* железнодорожный транспорт, механизмы излучения, сейсмоакустические поля, дальняя зона, волновая структура

### **Введение**

Железнодорожный транспорт является уникальным излучателем упругих полей за счет большого количества физических механизмов, начиная от статической нагрузки, вызванной весом поезда и включая интенсивных переменных колебаний вагонов и их различных частей.

Особенно важную практическую роль приобретает использование такого источника в задачах сейсмической разведки, для оценки воздействия упругих полей на повышение отдачи нефтяных и газовых скважин, взаимодействия низкочастотных акустических волн со слоистой структурой ионосферы, мониторинга карстовых образований, шумового «загрязнения» окружающей среды.

Исследования упругих полей железнодорожного транспорта, широко представленные в научной литературе, выполнены, как правило, для ближней и промежуточной зоны источника. На этом расстоянии волновое поле представляет собой сложную интерференционную картину, обусловленную суперпозицией волн различной природы (поверхностных, объемных, сдвиговых).

Настоящая статья является продолжением и развитием работы [1], где представлены первые результаты экспериментальных исследований сейсмических полей движущегося поезда в дальней зоне. В частности, в интегральной полосе частот 1-50 Гц

корреляционным методом были выделены две волны с кажущимися скоростями 2800 – 3000 м/с и 350-400 м/с. В настоящей статье на основе тонкого спектрального анализа определяются волновые характеристики конкретных низкочастотных гармоник сейсмического сигнала

## 2. Экспериментальные исследования

Подробное описание эксперимента приведено в докладе [2]. Железнодорожный путь представляет собой бесстыковые участки длиной 500–700 м, между которыми для компенсации температурного изменения длины рельсов вставлены 3–4 коротких рельса.

В эксперименте использована линейная антенна, расположенная на удалении 1000 м от железнодорожной колеи и ориентированная на стыковую часть железнодорожного пути. Датчики антенны установлены на расстоянии 10 м друг от друга и принимают колебаний скорости смещения грунта в полосе частот 1–100 Гц. Для измерения характеристик акустических полей в крайних точках антенны размещены инфразвуковые микрофоны.

Сигналы с датчиков антенны после усиления регистрировались на 14-канальном аналоговом магнитографе НО–68.

На рис.1 приведена нормированная осциллограмма скорости смещения грунта для движущегося грузового поезда, принятого первым датчиком.

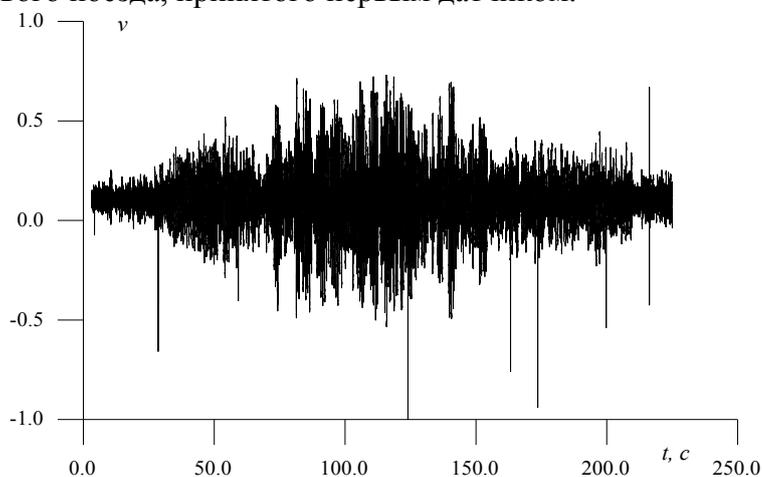


Рис. 1. Осциллограмма сейсмического сигнала грузового поезда.

Осциллограмма рисунка 1 показывает существенную величину соотношения сигнал/шум и ее изменчивость по уровню. Детальное представление временной реализации показывает наличие квазирегулярных цугов в вибрационном сигнале (рис. 2).

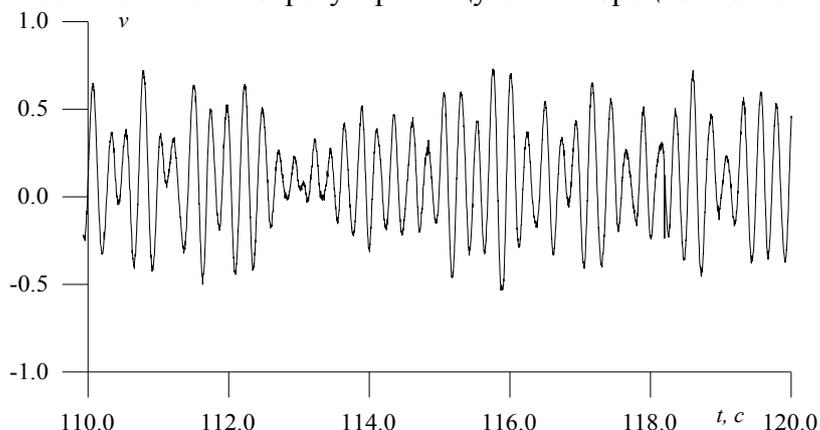


Рис. 2. Осциллограмма сейсмического сигнала грузового поезда с временным разрешением 10 с.

Выясним волновую природу сейсмического сигнала. В приведенном на рис. 3 спектре сейсмического сигнала (кривая 1) присутствуют две доминирующие по амплитуде гармоники на частотах 4,2 Гц и 2,7 Гц соответственно.

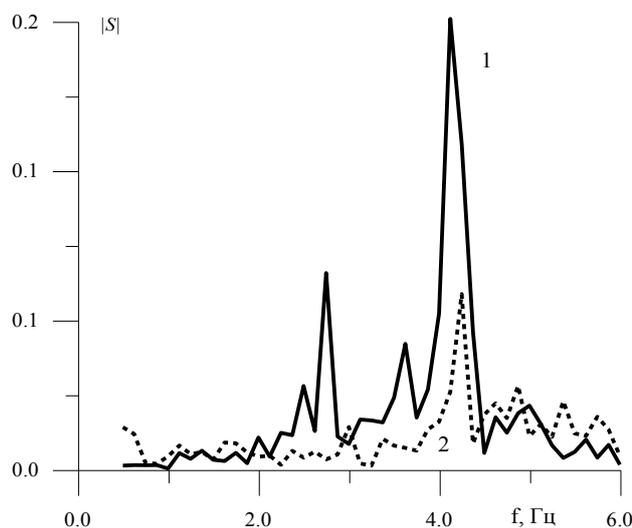


Рис. 3. Амплитудные спектры сейсмического (сплошная кривая 1) и акустического (пунктирная кривая 2) сигналов поезда на удалении 1000 м.

Анализ волновой природы сейсмической дискретности на частоте 4,2 Гц (сплошная кривая 1) показывает, что она вызвана преломлением акустической волны в точке расположения сейсмического датчика. Об этом свидетельствует тот факт, что в акустическом сигнале (пунктирная кривая 2) присутствует гармоника на это же частоте. Получено, что величина указанной частоты изменяется от состава к составу. Значение скорости распространения гармоники, измеренной путем фазового сдвига сигналов с разнесенных датчиков оказалось близкой к скорости звука в воздухе.

Можно предложить следующий механизм возникновения указанной дискретности в сейсмическом сигнале. В упрощенном варианте колебательную систему «вагон-грунт», приведенную в докладе [2], можно описать двумя подсистемами. Первая высокочастотная подсистема образована колебаниями вагона на упругости рессорного подвешивания. Характерные собственные частоты вертикальных колебаний для грузового вагона в зависимости от загруженности составляют 2–5 Гц [3]. Вагон под действием сил, вызванных соударениями колес на стыках рельс, будет совершать вертикальные и горизонтальные колебания на собственной частоте подвески и возбуждать инфразвуковые колебания в атмосфере. Этот поршневой механизм может быть значимым, так как возбуждение происходит распределенным источником – крышей или стенкой вагона. Соответствующие исследования, приведенные в работах [4-5] по трансформации акустических возмущений в вибрационные поля в грунте показывают конкурентно значимый вариант такого механизма возникновения сейсмического поля.

Вторая колебательная подсистема «балласт-грунт» выполняет роль фильтра, снижающего статические и динамические нагрузки от поезда на грунт. Частота собственных колебаний этой системы по расчетам работы [3] составляет 25–28 Гц. Отметим, что именно в этой полосе частот наблюдаются полученные в статье [1] объемные сейсмические волны со скоростями распространения 2500–2800 м/с.

Кроме указанных волн поезда, как источник переменный силы должен генерировать в твердой среде поверхностные волны. В спектре сейсмического сигнала рис. 3 (кривая 1) присутствует гармоника на частоте 2,7 Гц, волновая структура которой остается неисследованной. Отметим, что для нее нет совпадающей по частоте дискретности в кривой 2 акустического сигнала. Отклик на этой частоте наблюдается всегда даже при регистрации микросейсмических шумов, а значение этой частоты не изменяется при прохождении различных составов. В совокупности это свидетельствует о наличии характерной для данного региона слоистой резонансной структуры в грунте, в которой может происходить распространение квазирелеевских волн. Измерение фазовой скорости данной

спектральной компоненты сигнала потребовало ее фильтрации и выбора оптимальной апертуры антенны для устранения пространственной интерференционной структуры многомодовых поверхностных волн. На рис. 4 представлены обработанные осциллограммы сейсмических сигналов с первого и пятого датчиков антенны для временного интервала 83-84 с. Характерный период сигнала приблизительно равен 3,7 с, что соответствует частоте 2,7 Гц. Интервал скоростей распространения волны, измеренный по фазовому сдвигу, оказался равным 180–220 м/с, значения которых соответствуют поверхностным волнам [6].

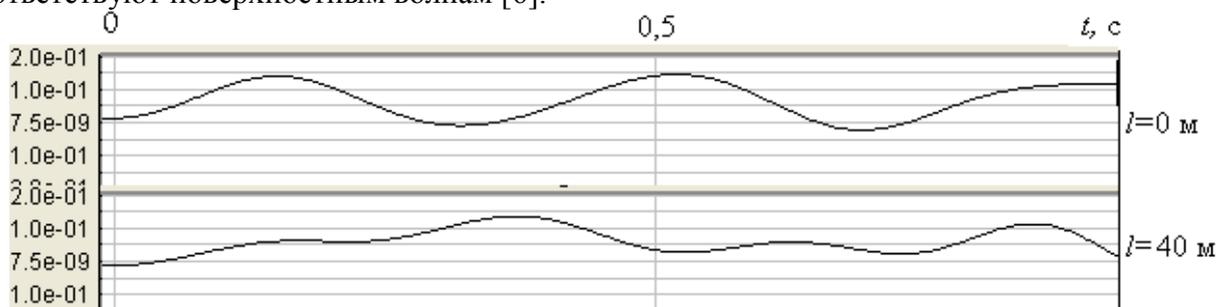


Рис. 4. Осциллограммы отфильтрованных сейсмических сигналов с первого и пятого датчиков.

### Заключение

Проведенные исследования сейсмических полей железнодорожного состава в дальней зоне показывают присутствие интенсивных по амплитуде низкочастотной гармонике со скоростью распространения близкой к скорости звука, которая представляют собой результат трансформации акустических волн в сейсмические на границе «атмосфера-грунт». Наличие таких инфразвуковых волн необходимо учитывать в задачах воздействия шума и вибраций на население и промышленные объекты.

Кроме того, в низкочастотном спектре сейсмического сигнала поезда наблюдаются обусловленные слоистой структурой твердой среды поверхностные волны, которые могут быть использованы в задачах сейсмической разведки и воздействия упругих волн на нефтяные и газовые пласты.

### Список литературы:

1. Бубнов Е.Я., Гуцин В.В. Экспериментальные исследования упругих полей железнодорожного транспорта в дальней зоне. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. № 2 (58), 2015.– С. 141–146
2. Бубнов Е.Я. Экспериментальные исследования волновой структуры сейсмоакустических полей железнодорожного транспорта в дальней зоне. // ВАК–2020: Труды Всероссийской акустической конференции. СПб. ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. – 2020 – С. 609-614
3. Динамика вагона: Учеб. для вузов ж.-д. транспорта. / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, И.И. Челноков. – М.: Транспорт, 1978. – 352 с.
4. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. Издательство АН СССР. М., 1977. – с.
5. Разин А.В. Возбуждение упругих волн импульсным звуковым источником, действующим на границе раздела газ–твердое тело // Акустический журнал. – 1993. – Т. 39. – № 3. – С. 530.
6. Богданов А.И. Сейсморазведка методом отраженных волн. Недра. М., 1982. – с.



## EXPERIMENTAL STUDIES OF SEISMIC-ACOUSTIC FIELDS GENERATED BY RAILWAY TRANSPORT IN THE FAR ZONE

E.Ya. Bubnov

*Abstract.* The radiation mechanisms, time and spectral characteristics of vibration signals generated by railway transport recorded at different distances have been examined. The seismic and acoustic fields generated by railway transport in the far zone have been studied in detail using a seismic linear array. (The cross-correlation function between the seismic signals from the moving train received by array sensors for different intervals of the realization has been obtained. A curve of arrival time versus distance to determine the speed of the identified waves has been plotted and the wave structure of the seismic field from the train in the far zone has been interpreted.)

*Keywords:* railway transport, radiation mechanisms, seismic-acoustic fields, far field, wave structure.

