УДК 539.3

СЕЙСМИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ, СОЗДАВАЕМЫЕ ЛЕГКОВЫМ АВТОМОБИЛЕМ, ДВИЖУЩИМСЯ ПО ШОССЕ

© Юрий Михайлович Заславский, Владислав Юрьевич Заславский
ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия
zaslav@appl.sci-nnov.ru

Аннотация. *Выполнены натурные эксперименты по регистрации и анализу характеристик вибросейсмических колебаний грунта вблизи шоссе, создаваемых быстро движущимся легковым автомобилем. Сотрясания грунта регистрируются с помощью приемной антенны – косы сейсмических приемников. Приемная система позволяет осуществлять сканирование характеристики направленности по углу азимута путем электронной перестройки фазы каждого канала регистрации. На сейсмограммах демонстрируются волновые годографы, на основе которых возможно определение текущих параметров: местоположения, направления и скорости транспортного средства при движении по шоссейным дорогам.*

Ключевые слова: *сейсмические колебания, коса сейсмоприемников, волновой годограф, автомобиль, транспортное средство, движение по шоссе.*

SEISMIC OSCILLATIONS GENERATED BY MOTOR CAR MOVING ALONG HIGHWAY

© Yu.M. Zaslavsky, V.Yu. Zaslavsky
IAP RAS, Nizhny Novgorod, Russia
zaslav@appl.sci-nnov.ru

Abstract. *Land experiments on recording and analysis of ground seismic oscillations near autobahn generated by quickly moving motor car are carried out. Ground oscillations are recording with the help of receiving antenna i.e. seismic cable. Receiving system permits to scan antenna directivity pattern by the azimuth in a way of electronic phase realignment of each recording channel. Wave hodograph curves are demonstrated on seismograms and on this basis it is possible to determine the routine parameters: location, direction and velocity motion of carrier by highway traffic.*

Keywords: *seismic oscillations, seismic cable, wave hodograph curve, motor car, carrier, highway traffic.*

В связи с ростом плотности транспортного движения, наиболее ощутимым в мегаполисах, нарастает потребность и интерес к исследованию сейсмических возмущений, создаваемых транспортными средствами, быстро движущимися по дорогам с хорошим гладким покрытием [1]. Такие исследования имеют перспективу в прикладном плане, а также представляют фундаментальный научный интерес. Движущийся транспорт является источником вибровоздействия, генерирующим на частотах 1..100 *Гц* сейсмические волны, бегущие по земной поверхности и на некоторой глубине вблизи нее. Такие колебания грунта достаточно часто проявляются в повседневной практике и ощущаются, например, в виде сотрясания сооружений, которые располагаются вдоль трассы движения транспортных потоков. Вместе с

тем, характеристики сейсмических волн техногенной природы, порождаемых движущимися источниками, часто оказываются все еще мало изученными. Эти волны сравнительно высокочастотны относительно сейсмических возмущений естественной природы, их своеобразие проявляется в характерной направленности и в дисперсионных эффектах при распространении. Информация, переносимая сигналами волн поверхностных типов, может найти применение в оценке состояния верхнего слоя грунта, на который ведется укладка полотна вновь строящейся или ремонтируемой шоссейной дороги. Они могут использоваться в службе инспекции или для контроля за соблюдением нормативных правил движения транспорта по внутригородским и междугородним автобанам. Последнее связано с возможностью определения местоположения источника генерации сейсмических волн и параметров его движения [2, 3].

К настоящему времени проведены многочисленные экспериментальные и теоретические работы по анализу акустических шумов, порождаемых движением транспорта, и микросейсмических колебаний антропогенной природы, выполненные различными авторами [4-8]. Вместе с тем, прием сигналов техногенной сейсмики многоканальной антенной – сейсмической косой дает ряд преимуществ относительно регистрации одиночными или малочисленными группами датчиков, как правило, используемых ранее. Применение современной цифровой техники обработки сигналов, регистрируемых многоканальной антенной, открывает новые возможности в мониторинге транспортной обстановки, в контроле или предупреждении аномальных явлений в грунтовой толще вблизи магистралей. Рассмотрим некоторые результаты, полученные на основе многоканального приема.

Экспериментальное исследование характеристик сейсмических сигналов, порождаемых быстро движущимся легковым автомобилем в условиях движения (со скоростями до $\sim 100\ км/час$) по автостраде с ровным асфальтовым покрытием, выполнено на основе регистрации сигналов на сейсмическую косу многоканального комплекса Lokalit (количество каналов при стандартном применении – 48). Схема эксперимента представлена на рис.1. Сейсмическая коса из 24 датчиков, регистрирующих колебания грунта вертикальной поляризации, размещенных в линию с шагом $d = 0.5\ м$, установлена на земной поверхности параллельно трассе на обочине с отступом от кромки на $1.2\ м$ и составляет в длину $11.5\ м$. В экспериментах автомобиль движется справа налево со скоростью: 1) $\sim 30-36\ км/час$ и 2) $\sim 70-80\ км/час$. Оцифрованный сигнал с выхода каждого канала регистратора записывается в оперативную память NoteBook, что позволяет его анализировать.

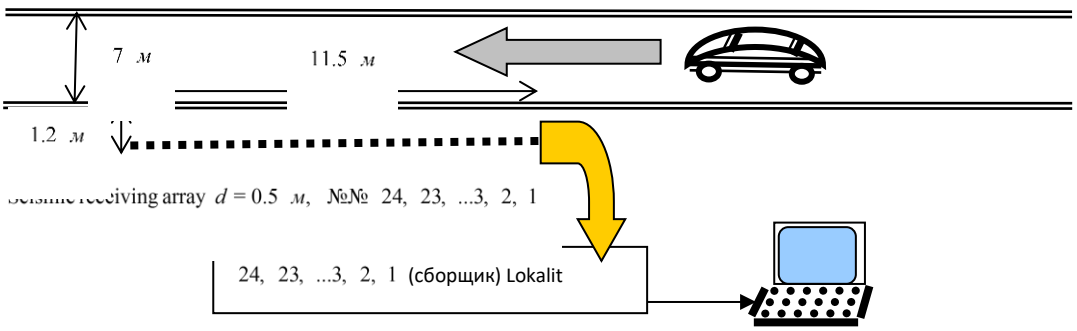


Рис.1. Общий вид эксперимента

Предварительно выполнены измерения скорости распространения поверхностной волны в грунте c_R, которая доминирует в сейсмическом отклике на датчиках приемной косы, путем регистрации линии волнового годографа, создаваемого неподвижным точечным источником импульсной вертикальной силы – «вертикально падающий груз» (см. рис.2).

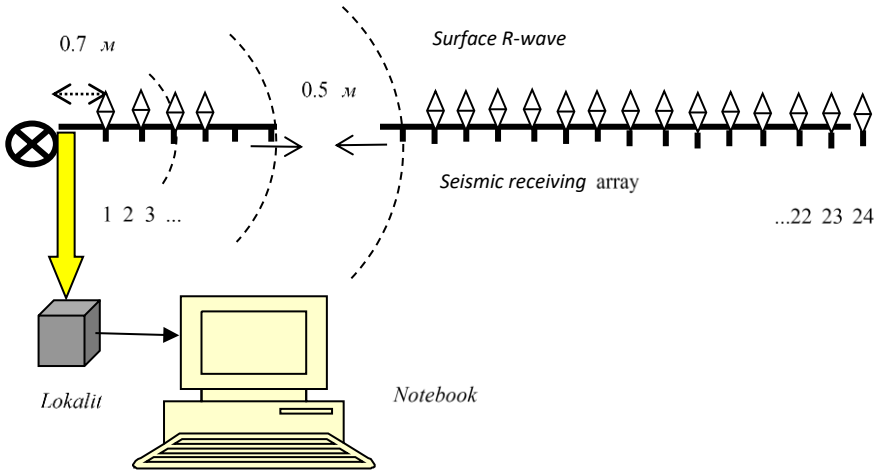


Рис.2. Схема эксперимента по определению скорости R-волны
⊗ – «вертикально падающий груз», ⟠ – сейсмоприемник

Измерение групповой скорости распространения в грунте нижайшей моды *R*-волны путем построения волнового годографа, соответствующего цугу сейсмического импульса от неподвижного стационарного источника (см. рис.3) показало, что ее значение в области сейсморазведочных частот близко к $c_R \approx 170$ *м/с*. Необходимость количественной оценки скорости распространения связана с обеспечением оптимальной расстановки сейсмоприемников в косе, при которой может быть сформирована антенна с так называемой «хорошо развитой апертурой» [9, 10]. В такой антенне уровень боковых лепестков относительно центрального лепестка достаточно низкий, а его ширина мала. При этом должны выполняться условия $L >> \lambda,\ d < \lambda/4$, где L – длина апертуры (базы), λ – средняя в полосе длина волны, d – шаг датчиков в решетке. В частности, при осуществлении сканирования главного лепестка ее диаграммы направленности используется добавка к фазе на каждой спектральной компоненте сигнала, входящей в рабочую полосу:

$$\Delta\varphi_{l,k}(f_j) = (2\pi d/c_R)\cdot(k - K/2)\cdot f_j \cdot \cos(\theta_{l\ scan}), \qquad (1)$$

где d – шаг дискретной расстановки в антенне, текущий угол сканирования $\theta_{l\ scan} = \pi l/180$, $l = 1..180$, $k = 1...K$ – номер элемента в антенне, f_j ($j \to j+1$) – значение перестраиваемой частоты при прямой и обратной Фурье-трансформации.

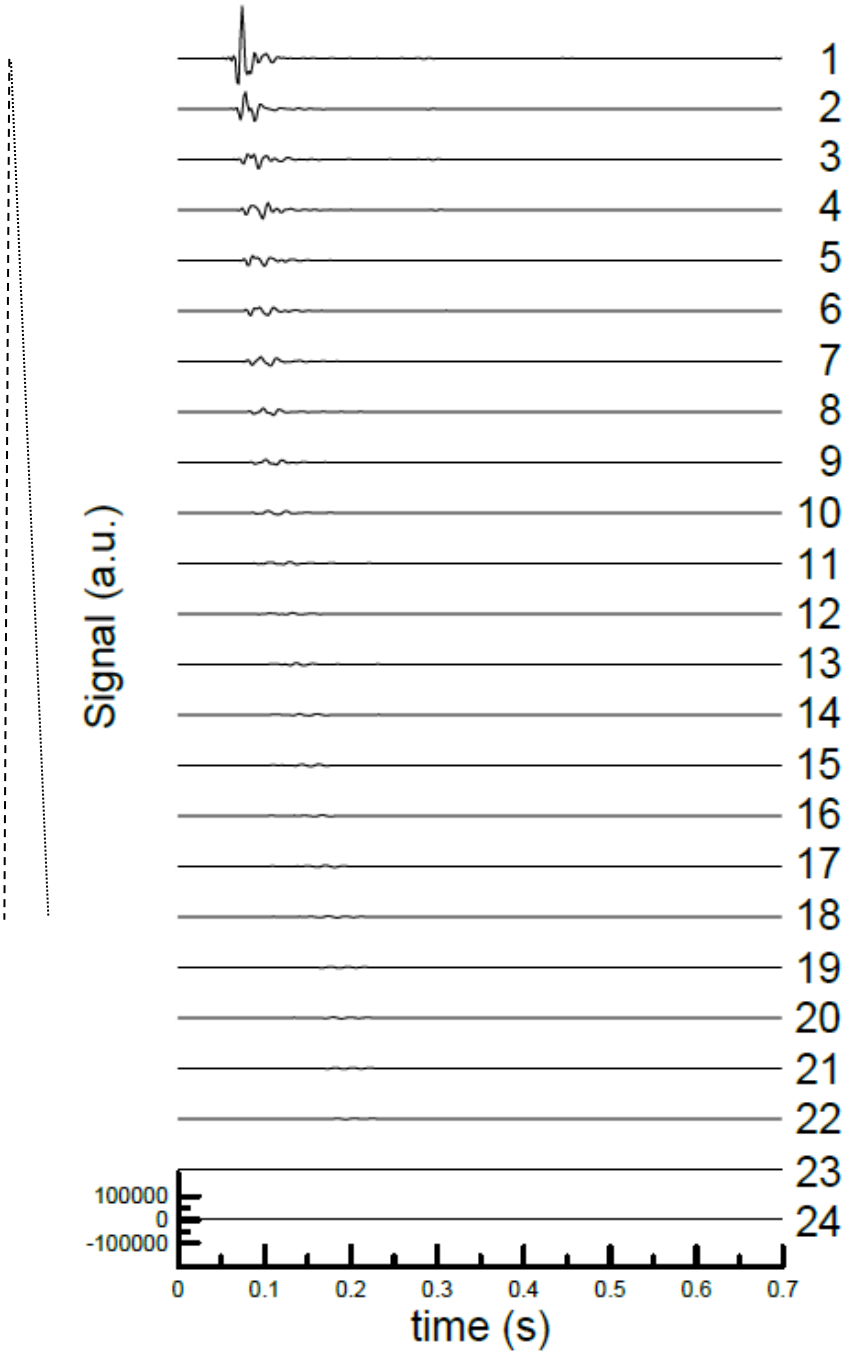


Рис.3. Годограф поверхностной волны в грунте (основная мода волны Рэлея) – удар кувалдой

Далее рассматривается волновое поле, порождаемое автомобилем, движущимся со скоростью ~ 30 – 36 *км*/*час* , и экспериментально зарегистрированное косой сейсмоприемников. На многоканальной записи реализаций на рис.4 – плоскость «амплитуда – время задержки» можно видеть присутствие откликов в виде волновых цугов, вступающих с некоторой регулярной временной задержкой. Соединяя линией точки, отвечающие одинаковой форме и фазе цугов, регулярно повторяющихся от реализации к реализации, получаем волновые годографы, по которым в сейсморазведке определяют скорость распространения волн [11].

При этом используется неподвижный источник возбуждения, устанавливаемый в фиксированном пункте земной поверхности. В рассматриваемом случае источник – автомобиль движется поступательно и на указанной плоскости можно видеть либо короткие одиночные одноперiодные импульсы длительностью ~ 50 *мс* (годографы №1, №2), либо волновые цуги с общей длительностью ~ 1 *с*, представляющие собой отклики с датчиков, располагающихся ближе к концу косы. Наклон годографов может оказаться вариативным, зависящим не только от характеристик грунта (как в сейсморазведке), но и от скорости движения источника.

По результатам спектрального анализа установлено, что частотный спектр сейсмосигнала (см. рис.5) на минимальной дистанции до объекта имеет максимум на частоте ~ 20 *Гц*, а его рабочая полоса простирается до ~ 160 *Гц*. С учетом (1) это позволяет рассчитать требуемую добавку к фазе для сканирования диаграммы антенны на частотах указанного интервала и оптимизировать расстановку приемников в апертуре.

Первые из упомянутых импульсов (годографы №1, №2) имеют акустическое происхождение, что подтверждается одноперiодной одиночной формой, малой длительностью и наклоном линии годографа, соответствующим скорости звука в воздухе $c_{sound} = 340$ *м/с* (на базе длиной 11.5 *м* – задержка 0.035 *с*). Они синхронны оборотам колеса, что указывает на движение источника.

Следующие годографы №3, №4 соответствуют паре сейсмических волновых цугов, регулярно сохраняющихся на всех реализациях. Они характеризуются незначительным нарастанием уровня отклика на датчиках, располагающихся ближе к концу косы. Общая длительность совокупности сейсмических цугов (включая более мелкие) $\sim 0.5-1$ *с*. Генерация сейсмических сигналов обусловлена взаимодействием шины колеса с микропрофилем дорожного покрытия, имеющего случайный шероховатый характер поверхности. Оно создает в области контакта хаотически осциллирующую силу, воздействующую на поверхность дорожного покрытия, движущуюся вместе с автомобилем и является источником генерации в основном поверхностных сейсмических волн рэлеевского типа с широкой спектральной полосой. Плавная вариация уровня максимума отклика с ростом номера датчика косы связана также с влиянием усредненной по частоте диаграммы направленности сейсмоизлучающей системы – совокупности опорных точек движущегося автомобиля.

Таким образом, регистрируя сейсмосигналы на стандартную приемную косу с небольшой базой в 11.5 *м*, содержащей 24 датчика (и соответствующие им 24 канальные записи, вместо стандартной для сейсморазведки 48 канальной), можно визуализировать реализации не менее чем с десятка соседних номеров, с использованием которых выполняется построение линий годографов на плоскости «амплитуда – время задержки». Это свидетельствует о возможности сейсмического мониторинга волнового поля, порождаемого автомобилем, с использованием косы сейсмических приемников с короткой базой. Осциллограммы с датчиков с номерами $n \geq 24$ на более протяженной антенне будут иметь аналогичную форму или близкую к уже демонстрируемым. При этом данные о таком информативном параметре как задержка времени $\tau \approx 0.25$ *с* между цугами, стабильно формируемыми в сигналах на датчиках, соответствующих концу базы, позволяют получить оценку

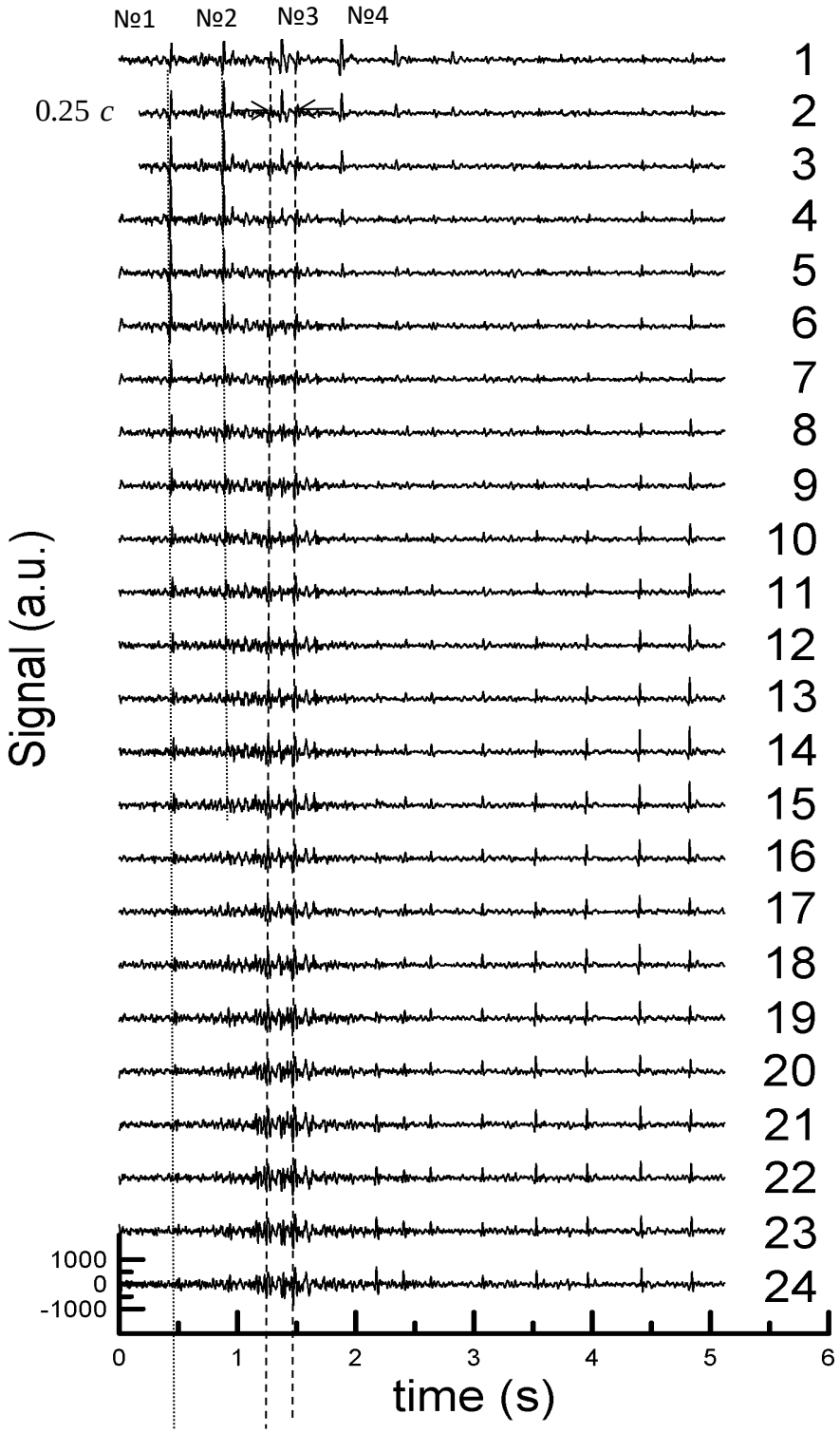


Рис.4. Отклики с датчиков сейсмической косы как функция времени. 24-канальная запись. Автомобиль движется по шоссе со скоростью $\sim 30-36$ *км/час. Пунктиры №1, №2 – линии годографа акустического импульса (скорость* $c_{sound} = 340$ *м/с), штриховые линии №3, №4 – годографы сейсмических цугов.*

скорости движения автомобиля. В частности, если учесть, что его межосевая дистанция ~ 3 *м*, скорость движения транспортного объекта оценивается как $\sim 3/0.25 \approx 40$ *км/час*. Важным обстоятельством является выбранное удаление антенны от обочины в ~ 1 *м*, при котором по характеру сигналов всей совокупности приемников в косе еще возможен прогноз скорости объекта. При невысокой скорости движения, как это видно, в отклике присутствуют не более трех-четырех мелких цугов, что дает также информацию о числе точек контакта с полотном дороги, поскольку это число совпадает с фактическим числом колес. Информация о числе контактов объекта (что важно для идентификации), как показано далее, сохраняется и в случае более высоких скоростей движения, как и возможность получения приемлемой оценки скорости. В дальнейших исследованиях предполагается проанализировать зависимость указанной информативной характеристики от такого параметра как удаление антенны от трассы.

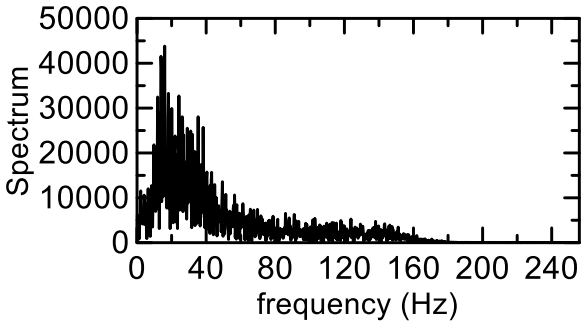


Рис.5. Спектр сейсмического отклика, создаваемого автомобилем, движущимся на скорости $\sim 30-36$ *км/час . Удаление объекта от косы* $\sim 15-20$ *м , амплитуда в относительных единицах.*

Аналогичные результаты получены при многоканальной регистрации и последующем анализе сейсмического волнового поля, порождаемого автомобилем, движущимся с более высокой скоростью. При движении по шоссе типичными являются скорости, близкие к значению ~ 100 *км/час*, поэтому на рис.6 на плоскости «амплитуда – время задержки» представлена совокупность реализаций – волновых откликов, создаваемых автомобилем, движущимся со скоростью $\sim 70-80$ *км/час* по той же трассе. Проведя линии, соединяющие в соседних реализациях (с 1-го по 24-й номер) точки с идентичной фазой в близких по форме цугах, можно получить пару или тройку характерных волновых годографов. В этом случае характер реализаций сейсмического отклика и упомянутых годографов на указанной плоскости, оставаясь похожим, несколько иной. Эти годографы в отличие от годографов поверхностных волн с неподвижным источником, вообще говоря, непрямолинейны и средний угол их наклона может оказаться нулевым и даже отрицательным, что свидетельствует о движении источника со значительной скоростью. Кроме того, соединяя упомянутые точки в преобладающих двух или трех цугах линией, можно сформировать «парные» годографы. При этом самой причиной образования коротких волновых цугов, излучаемых при равномерном движении автомобиля, является совокупное влияние дисперсии поверхностных волн, волновая интерференция и допплеровское смещение частоты. Указанные факторы проявляются при значительной скорости источника и сравнительно низкой скорости распространения волн, несмотря на хаотически осциллирующее, непрерывное во времени воздействие на твердую поверхность со стороны колес. Наблюдается смена в доминировании волновых цугов по уровню. Вначале приходят отклики на датчики с 3-го по 24-й номер, образуя первый годограф. Спустя ~ 150 *мс*

на все датчики вступает второй цуг и образуется второй годограф. Примерное постоянство уровня сейсмического отклика сохраняется в максимумах цугов на датчиках с 10-го по 24-й номер. Третий годограф образуется на датчиках с номерами с 1-го по 17-й при задержке в ~ $600\ мс$. Описываемая волновая картина является результатом сейсмоизлучения всех 4-х колес движущегося автомобиля, воздействующих совместно. Однако, как и в прежнем случае пониженной скорости движения, однозначная интерпретация или привязка какого-то одного из 4-х колес (или даже осей) в качестве первоисточника, вносящего преобладающий вклад в воздействие, порождающего тот или иной годограф, вряд ли возможна. Также вызывает затруднение и точная привязка пространственного положения, занимаемого автомобилем по мере движения мимо косы, к разным моментам времени. Вместе с тем, очевидно, что сигналы, регистрируемые датчиками в средней части базы, можно условно рассматривать как соответствующие точке траверза, когда автомобиль минует ее центр. Можно отметить практически важную характерную особенность, проявляющуюся также и в предыдущем эксперименте с пониженной скоростью – это присутствие парных годографов, построенных по совокупности реализаций с датчиков последних номеров, в которых регулярно преобладают два характерных коротких цуга. Они имеют между собой временную задержку, соответствующую или связанную со скоростью движения автомобиля. В последнем случае она составляет $\tau \approx 150\ мс$. Если принять, что источник генерации «срабатывает» как бы в моменты, разделяемые задержкой, определяемой временем, затрачиваемым на движение от передней до задней оси и учесть, что расстояние между передней и задней осью автомобиля ~ $3\ м$, то нетрудно получить расчетное значение скорости, которое оказывается равным ~ $72\ км/час$, достаточно близкое к фактическому значению. Из результатов эксперимента следует, что для получения данных о скорости движения практически наиболее пригодны отклики, регистрируемые датчиками косы последних номеров, когда направление движения удаляющегося от траверза источника почти совпадает с осью косы (годографы №1, №2).

Спустя $\sim 2.5\ с$ времени после прихода на антенну сейсмического отклика, обозначенного упомянутыми парными годографами, можно наблюдать приход волнового цуга $\sim 0.5\ с$ длительности. Его следует рассматривать как приход сейсмического отклика, создаваемого воздействием на грунт вихревого воздушного потока, тянущегося вслед за быстро движущимся по шоссе автомобилем и родственного вихрям, образующимся в воде за бортом и кормой судна, идущего с крейсерской скоростью. Такой же или аналогичный цуг в предыдущем случае при скорости движения $\sim 30-36\ км/час$ (см. рис.4) не зарегистрирован.

Отметим, что регистрация отклика воздушно-вихревой природы с помощью сейсмической косы оказывается предпочтительнее, чем с помощью воздушно-акустической антенны микрофонов.

Таким образом, по результатам эксперимента показано, что путем регистрации сейсмических колебаний грунта вблизи дорожного полотна автотрассы, порождаемых быстро движущимся автомобилем, принципиально возможен бесконтактный контроль скорости движения одиночного автомобиля, что представляет важную компоненту мониторинга транспортного движения (в том числе без участия оператора). Для этой цели целесообразно применение сейсморазведочного комплекса (используемого при стандартной геофизической разведке приповерхностной структуры грунта), включающего как основной элемент – косу сейсмоприемников. При этом предполагается общепринятая стандартная обработка цифровых массивов с применением хорошо известных алгоритмов и программ, реализующих (в реальном масштабе времени) оперативный анализ характера сейсмического поля по данным многоканальной записи.

В дальнейшем представляет интерес проведение аналогичной регистрации и анализа сейсмического поля, порождаемого вблизи автотрассы движущимися тяжелыми грузовыми

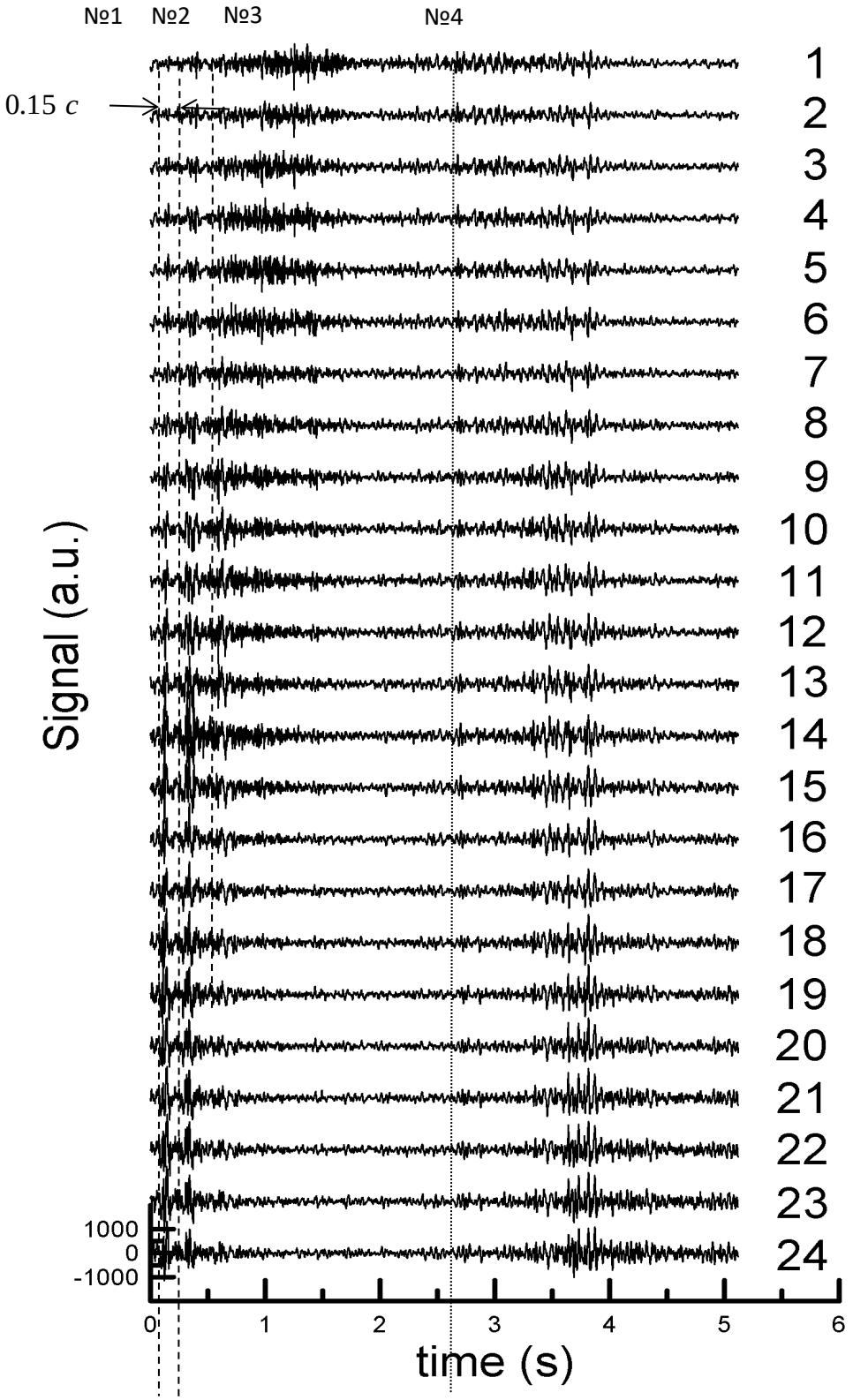


Рис.6. 24-канальная запись откликов с датчиков сейсмической косы. Автомобиль движется по шоссе со скоростью ~70 км/час. Штриховые линии 1, 2 – пара характерных сейсмических годографов. Пунктир 4 – годограф сейсмического цуга от вихревого воздушного потока.

транспортными средствами (двухосными и многоосными). Насколько картина волнового поля для этих объектов будет подобной той, что дана в уже описанном случае легкового автотранспорта, представляет значительный интерес при идентификации или классификации.

Кроме того, одновременно с сейсмическим полем с использованием многоканальной антенны микрофонов необходимо зарегистрировать воздушно-акустический шум, порождаемый в тех же условиях автомобилями разных классов. При этом данные о скорости движения, получаемые по результатам обработки сигналов по каналам «акустики» и «сейсмики», могут иметь при условии их непротиворечивости более высокую надежность и точность. Значительный интерес представляет определение предельного удаления от трассы приемного пункта с расположенной в нем сейсмической косой, при котором информация о параметрах движения объекта сохраняется.

Список литературы

1. Proceedings of European Conference on Noise. (Euro Noise 2015) Netherland. Maasterichts. 2015.
2. Мясникова Н. В., Берестень М. П., Дудкин В. А. Экспресс-анализ сейсмических сигналов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. Электроника, измерительная и радиотехника. 2007. № 4. С.144-151.
3. Агафонов В.М., Афанасьев К.А., Яшкин А.В. Определение направления на движущийся объект с использованием сейсмического модуля, содержащего молекулярно-электронные датчики движения // Труды МФТИ. Теоретическая и прикладная механика. 2013. Том 5. № 2. С.142.
4. Панков А.А., Дудкин В.А. Об использовании комбинирования акустических и сейсмических принципов обнаружения наземных объектов // Надежность и качество сложных систем. 2011.
5. Алямкин С.А. Классификация объектов в сейсмической системе обнаружения с учетом параметров их движения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Новосибирск. 2014.
6. Обертов Д.Е. Идентификация параметров движущихся транспортных средств. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. Санкт-Петербург, 2014
7. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. Моделирование сейсмических волн, создаваемых движущимся транспортом // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 1-1 (8). С.7-11.
8. Заславский Ю.М. Моделирование высокочастотных сейсмоколебаний, возбуждаемых городским транспортом // Изв. ВУЗов Строительство 1994. №2. С.109-111.
9. Ермолаев Т.В., Флаксман М.А. Курс антенные решетки. Н.Новгород:Изд-во ННГУ, 2007.
10. Смарышев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. Л.: Судостроение, 1984.

11. Сейсморазведка. Справочник геофизика / Под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. М.: Недра, 1981. 464с.

Дата поступления статьи: 25 октября 2016 года.