



СВОЙСТВА СИГНАЛОВ ВИБРАТОРА И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ УСЛОВИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ

С.В. Колесов, А.П. Жуков

ООО “Геофизические системы данных”

125319, Москва, ул. Аэропортовская 1-я, 6, офис VI, Россия; e-mail: info@gds.ru

Сигналы с опорной плиты и инертной массы вибратора могут использоваться не только для автоматического регулирования работы вибратора, но и для определения спектральных характеристик условий возбуждения, жесткости системы вибратор–грунт и информации о волнах-гармониках. Это дает возможность производить адаптацию сигнала к изменяющимся условиям возбуждения при наблюдениях с помощью бескабельных регистрирующих систем, выделять нелинейные явления, связанные с геологической средой, а не с системой возбуждения.

Сейсмический вибратор, базовая плита, реактивная масса, условия возбуждения, волны-гармоники, система вибратор–грунт, адаптация

VIBRATOR SIGNAL PROPERTIES FOR STUDYING EXCITATION CONDITIONS

S.V. Kolesov, A.P. Zhukov

GDS Ltd

125319, Moscow, Aeroportovskaya 1-ya, 6, office VI, Russia; e-mail: info@gds.ru

Vibrator baseplate and reaction mass signals can be useful not only for automatic regulation of seismic vibrator operation, but also for definition of the spectral characteristics of vibration conditions to receive information on vibrator–ground assembly rigidity and harmonic distortions. The result can be adaptation of sweep-signal to changing surface conditions while using cable-free acquisition systems. This also can be useful for separation of the nonlinear phenomena that are related to the medium rather than to the excitation system.

Seismic vibrator, baseplate, reaction mass, excitation conditions, harmonic distortions, vibrator–ground assembly, adaptation

ВВЕДЕНИЕ

Сигналы электрогидравлических вибраторов (свойства которых рассматриваются ниже) используются в системе автоматического регулирования вибратора, обрабатывающего опорный сигнал $S(t)$ – “программу”, заданную ему геофизиком. Характер спектра сигнала, посылаемого в среду, можно оценить по Ground Force (“земляной” силе) – $GF(t)$:

$$GF(t) = BP(t)*m + RM(t)*M, \quad (1)$$

где $BP(t)$ – ускорение опорной плиты вибратора, $RM(t)$ – ускорение реактивной массы, m – масса плиты со штоком и M – реактивная масса. Ускорения $BP(t)$ и $RM(t)$ и есть сигналы вибратора, с помощью которых осуществляется обратная связь в системе авторегулирования. Очевидно, что свойства сигналов $BP(t)$ и $RM(t)$ будут изменяться в зависимости от свойств грунтов на разных пунктах возбуждения (ПВ). Одна из первых работ по изучению влияния условий установки источника на излучаемый сигнал – авторское свидетельство [Кузнецов, Осауленко, 1976], но лишь заметно позже появилась возможность регистрации сигналов вибратора на каждом ПВ и адаптации их параметров к условиям возбуждения.

ОПИСАНИЕ СИГНАЛОВ ВИБРАТОРА

При полевых работах по технологии АВИСейс [Жуков, Шнеерсон, 2000] в 2013–2014 гг. попутно про-

изводилась регистрация сигналов вибратора: опорного – $S(t)$, с акселерометров на плите – $BP(t)$ и инертной массе $RM(t)$, а также сигнала $GF(t)$. На каждом ПВ первым запускался “настроечный” ЛЧМ (линейный) свип. Далее на основании анализа коррелограммы, зарегистрированной на рабочей косе, вычислялись параметры оптимального адаптивного нелинейного (НЧМ) свипа и с ним обрабатывалось пять или шесть накоплений [Жуков и др., 2011].

Из повольного анализа сигналов $S(t)$, $BP(t)$, $RM(t)$ и $GF(t)$ и их амплитудных спектров на многих ПВ следует, что эти спектры соответствуют почти идеальным условиям возбуждения, кроме дисперсии спектральных амплитуд (об этом см. ниже). Обычно наблюдается плавное увеличение спектра сигнала с плиты $BP(\omega)$ и, соответственно, уменьшение амплитуд спектра сигнала с реактивной массы $RM(\omega)$ – по мере роста частоты развертки. Вибратор возбуждает сигнал $GF(t)$ со спектром $GF(\omega)$, который по свойствам близок к спектру опорного сигнала. Условия возбуждения по площади могут меняться, и это отражается на сигналах с плиты и массы – $BP(t)$, $RM(t)$ и в меньшей степени – на $GF(t)$. На рис. 1 показаны амплитудные спектры сигналов $BP(\omega)$, $RM(\omega)$ и $GF(\omega)$, зарегистрированных на разных ПВ, все от опорных ЛЧМ-сигналов в диапазоне 10–100 Гц. Спектры $BP(\omega)$ и $RM(\omega)$ на разных ПВ различаются, видны разного вида “ис-

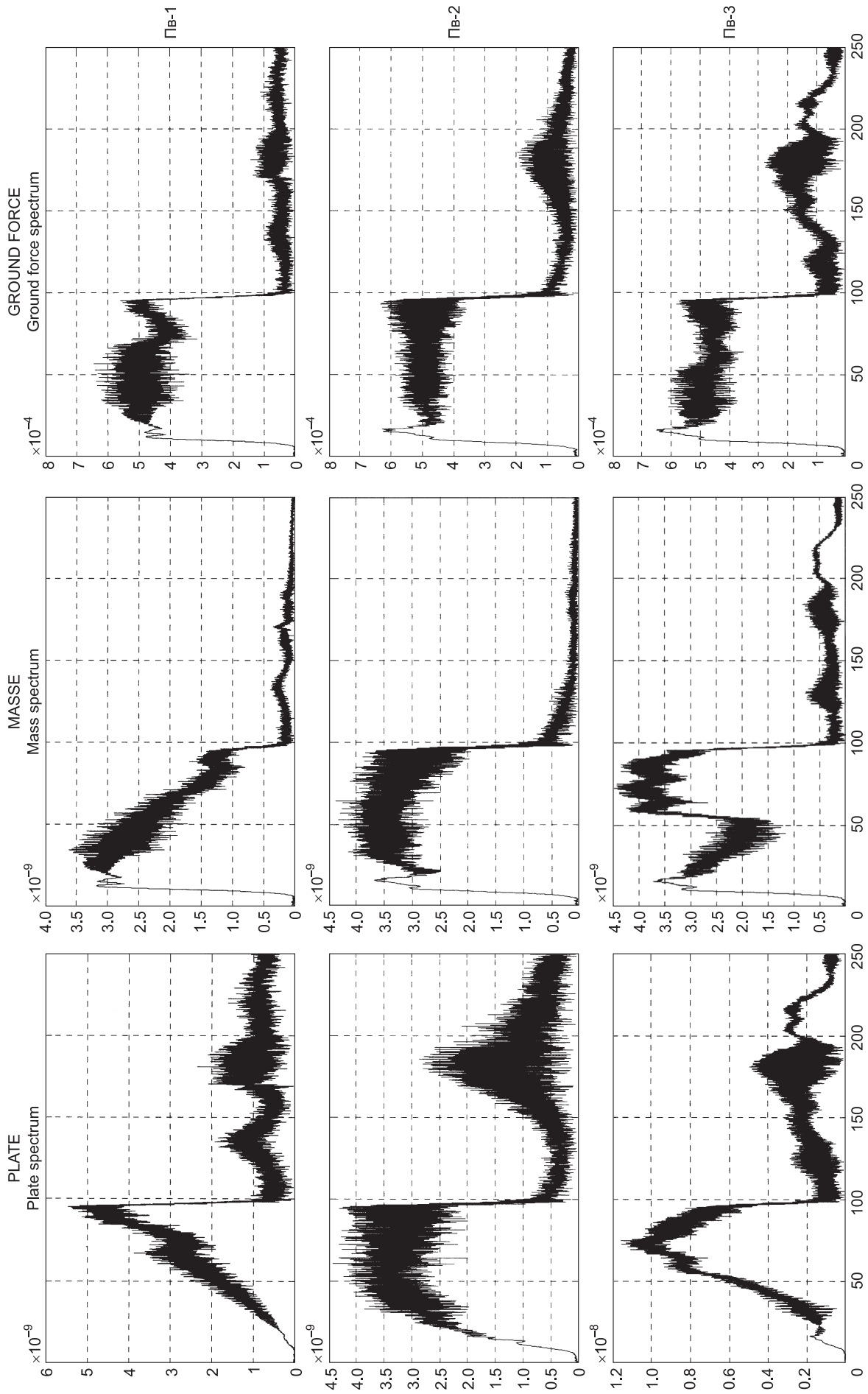


Рис. 1. Сигналы с опорной плиты – *BP* (PLATE), реактивной массы – *RM* (MASSE) и силы *GF* (GROUND FORCE) для трех разных ПВ при одном и том же опорном ЛЧМ-сигнале: частоты 10–100 Гц, длительность – 10 с.

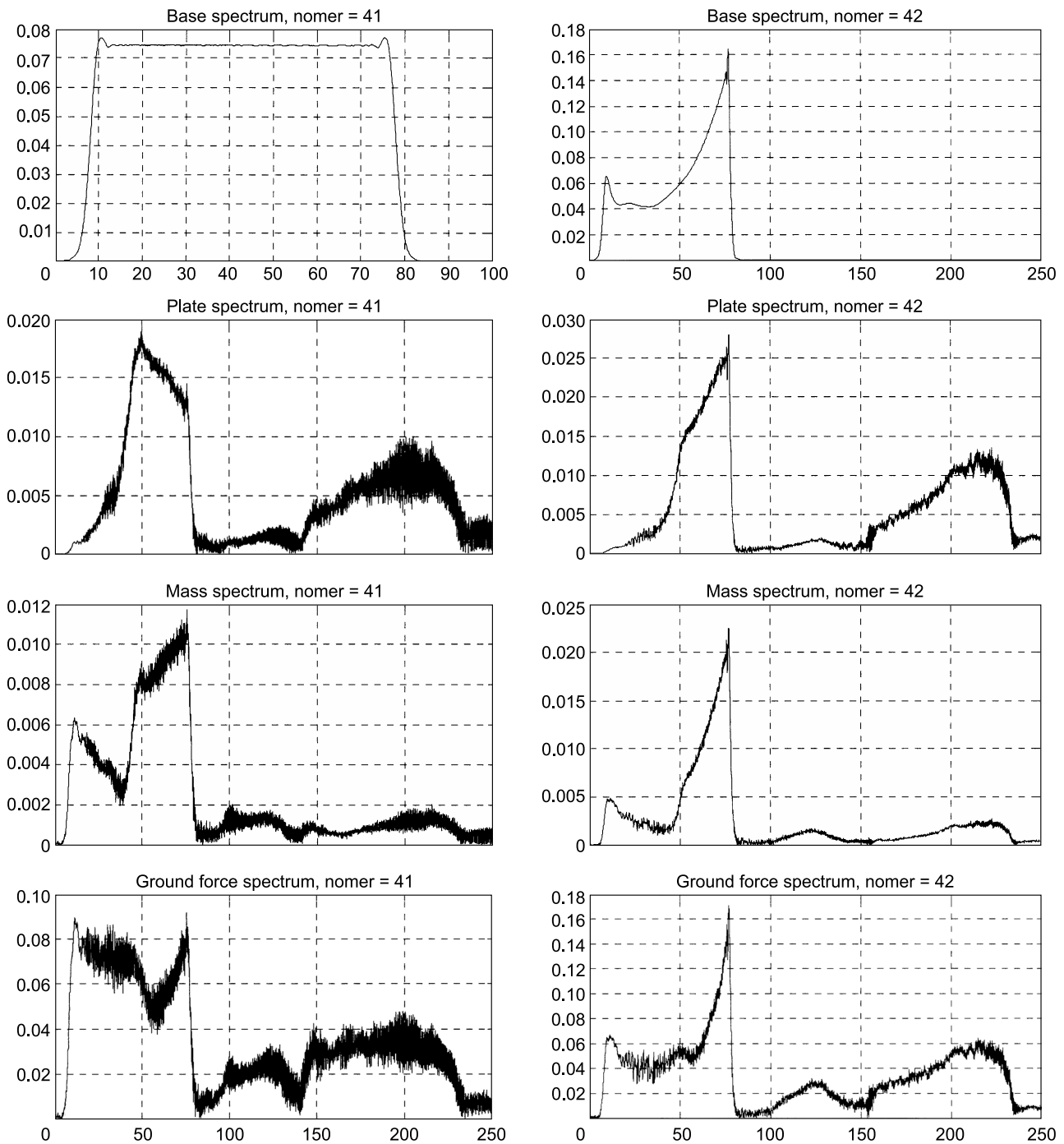


Рис. 2. Уменьшение дисперсии спектральных амплитуд на одном ПВ при повторном пуске свипов: сначала ЛЧМ (левые спектры), а затем адаптивного НЧМ (правые спектры).

Генерация волн-гармоник не меняется, и она, похоже, не связана с дисперсией спектральных амплитуд.

кажения” спектров, причем часть “искажений” отображается далее и на спектрах $GF(\omega)$.

Несколько сложнее сравнивать сигналы опорные $S(t)$ и $GF(t)$ для свипов нелинейных, со спектрами, отличающимися от константы в интервале возбуждаемых частот. Но здесь также есть соответствие $S(\omega)$ и $GF(\omega)$ (рис. 2) для адаптивного свипа, но есть и провалы у спектров $BP(\omega)$, $RM(\omega)$ и $GF(\omega)$. При анализе $S(\omega)$, $BP(\omega)$, $RM(\omega)$, $GF(\omega)$ на разных ПВ целесообразно обращать внимание

1) на характер изменений осредненных амплитуд спектров (тенденции, а также пики и провалы) в зависимости от ПВ и частоты свипа;

2) на то, как изменения спектров сигналов $BP(t)$ и $RM(t)$ при разных условиях возбуждения влияют на вид спектра $GF(t)$, какие изменения компенсируются при вычислениях $GF(t)$, а какие остаются в его спектре;

3) на наличие и мощность побочных гармоник, вид и максимальные амплитуды их спектров, соотно-

шение параметров побочных гармоник для $BP(t)$, $RM(t)$ и $GF(t)$; на рис. 1 им соответствуют частоты более 100 Гц, а на рис. 2 – более 80 Гц, в зависимости от полосы возбуждения;

4) на величины общей дисперсии спектральных амплитуд и ее изменение в зависимости от частоты, номера пуска на ПВ и других факторов (см. рис. 1, 2).

При анализе нужно учитывать и влияние разного рода помех, но здесь потребуется большое количество статистических данных, чтобы вычлениить признаки, по которым можно было бы предсказывать значимые для сейсморазведки изменения условий возбуждения.

Для оценки изменений условий возбуждения с помощью анализа $BP(t)$, $RM(t)$, $GF(t)$ и их спектров целесообразно использовать в качестве опорных одинаковые ЛЧМ-свипы для всех исследуемых ПВ. Вместе с тем в практике сейсмических работ более эффективными являются нелинейные – НЧМ-сигналы. Можно полагать, что условия возбуждения сейсмических сигналов одни и те же для любых сигналов. Однако это требует проверки. В целом наиболее интересны сигналы с плиты – $BP(t)$, а именно:

- вариациями амплитуд, помехами на временной развертке;
- общей дисперсией амплитудно-частотных характеристик (АЧХ);
- наиболее сильными побочными гармониками (по сравнению с $RM(t)$);
- характером изменения амплитуд спектра в зависимости от частоты;
- различиями начальных амплитуд АЧХ на разных ПВ;
- разрастаниями амплитуд спектра на определенных частотах (частично они могут повторяться и на $RM(t)$, и на $GF(t)$);
- провалами в спектре, которые иногда повторяются и на $RM(t)$, и на $GF(t)$.

Все опорные сигналы были в интервалах частот до 80 или до 100 Гц, так что спектральные амплитуды после 80 или 100 Гц можно отнести к побочным гармоникам – кратным, суммарным, вызванным нелинейными искажениями основного сигнала (1-й гармоники). При шаге дискретизации 0.001 с максимальная частота спектра считается 250 Гц, если исключаются алейсинг-эффекты. На рис. 1 и 2 изображены спектры в диапазоне до 250 Гц. На рис. 1, где после 100 Гц видны спектральные амплитуды, которых нет в опорном ЛЧМ-сигнале, или на рис. 2 на частотах после 80 Гц четко видно, что побочные гармоники сильнее всего проявляются на спектрах сигналов с плиты, слабее всего – на сигналах с массы, с промежуточными амплитудами – на сигналах $GF(t)$.

Соотношение между амплитудами спектров сигналов с плиты и массы было отмечено еще в [Shrodt, 1987]: на мягких грунтах видно, как вибрирует плита, а масса ведет себя спокойнее, тогда как на жестком, скальном грунте сильно подскакивает масса, а движения опорной плиты почти не видно. Так что соотношение амплитуд волн-гармоник на сигналах с плиты и массы зависит от условий возбуждения. Общая мощность волн-гармоник и распределение их амплитуд по частотам – разное на разных ПВ (см. рис. 1, 2). Одним из источников волн-гармоник является сам вибратор, и их энергия связана с убывлю спектра мощности сигналов, относящемуся к диапазону возбуждаемых частот.

При определении энергии побочных гармоник и использовании ее для каких-то оценок условий возбуждения нужно учитывать, что часть энергии волн-гармоник находится в пределах диапазона частот возбуждения, еще часть энергии исходного спектра может рассеиваться (переходить в тепло). Видимо, целесообразно определять условную энергию гармоник по мощности спектра $S(t)$ и нормированной площади спектра мощности сигнала $GF(t)$ за пределами полосы частот возбуждения. Мощность какой-то конкретной гармоники (2-й, 3-й и т. д.), очевидно, можно оценить и с помощью функции взаимной корреляции. То, что характеристики спектров волн-гармоник изменяются по площади работ, подсказывает, что нужно искать закономерности их появления, в частности, от условий возбуждения.

Дисперсия спектральных амплитуд, которую можно видеть на рис. 1, 2, обусловлена “модами” – в результате изгибов плиты и отражений колебаний от ее частей. По мере отработки ПВ “моды” ослабляются.

Дисперсия спектральных амплитуд может изменяться с частотой (см. рис. 1, 2), а может быть и равномерной по частотам спектра.

ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ СИГНАЛОВ ВИБРАТОРА

Характер изменений сигналов по площади работ и их учет. Возбудитель вибрации передает колебания в грунт посредством опорной (базовой) плиты, которая вовлекает в движение “присоединенную массу” грунта [Чичинин, 1984]. Как свойства грунта будут изменяться по площади работ, желательно знать заранее, для чего предварительно районировать площадь работ, чтобы приспособливаться к изменениям условий возбуждения для стабилизации параметров сигналов $GF(t)$ с целью улучшить качество результатов сейсморазведочных работ.

Адаптация параметров возбуждения по сигналам вибратора. Информация об условиях возбуждения может быть использована для выбора оптимальных параметров опорных сигналов. Одним из способов адаптации является технология АВИСейс [Жуков, Шнеерсон, 2000], где используется коррелограмма, полученная на данном ПВ. Однако информация, полученная на основе анализа сигналов вибратора, также может быть использована для коррекции параметров возбуждения, но уже без регистрации виброграмм. Такой подход пригоден для работ с бескабельными системами регистрации.

Нелинейные сейсмические эффекты и условия возбуждения. Нелинейные сейсмические эффекты (НСЭ) и волны-гармоники в том числе представляют интерес для поисков и разведки месторождений УВ, но система вибратор–грунт сама является источником НСЭ, так что необходимо знать, какие волны-гармоники относятся к очагу возбуждения и должны рассматриваться как помехи, а какие возникают в пласте-коллекторе и могут быть использованы для поисков месторождений УВ.

Характер некоторых НСЭ можно оценить по сигналам вибратора $BP(t)$ и $RM(t)$. Результаты воздействия таких НСЭ можно, с одной стороны, использовать при корреляционной обработке виброграмм, считая, что волны-гармоники – это часть оператора корреляции, а с другой – попробовать ослабить волны-гармоники за счет коррекции параметров опорного сигнала и смены местоположения опорной плиты на местности.

УРАВНЕНИЯ РАБОТЫ ВИБРАТОРА И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСЛОВИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ

В работе [Кузнецов, Осауленко, 1981] частотной характеристикой условий установки вибратора считается отношение спектров перемещений опорной плиты $bp(\omega)$ и задающего сигнала $s(\omega)$. Полагается, что электрический сигнал $s(\omega)$ преобразуется гидросистемой в механический сигнал $rm(\omega)$ с постоянным (по частоте) коэффициентом пропорциональности B , т. е. $s(\omega) = B^*rm(\omega)$.

Согласно механической схеме вибратора, стоящего на грунте, включающей опорную плиту со штоком и гидроцилиндр (инертная масса), приводится следующее уравнение из указанной статьи:

$$-\omega^2 mbp(\omega) + k(\omega)bp(\omega) = \omega^2 Mrm(\omega), \quad (2)$$

где $bp(\omega)$ и $rm(\omega)$ – комплексные спектры перемещений опорной плиты и инертной массы; m и M – соответственно их массы; $k(\omega)$ – жесткость системы плита–среда, ω – круговая частота. В уравнении (2) $\omega^2 bp(\omega) =$

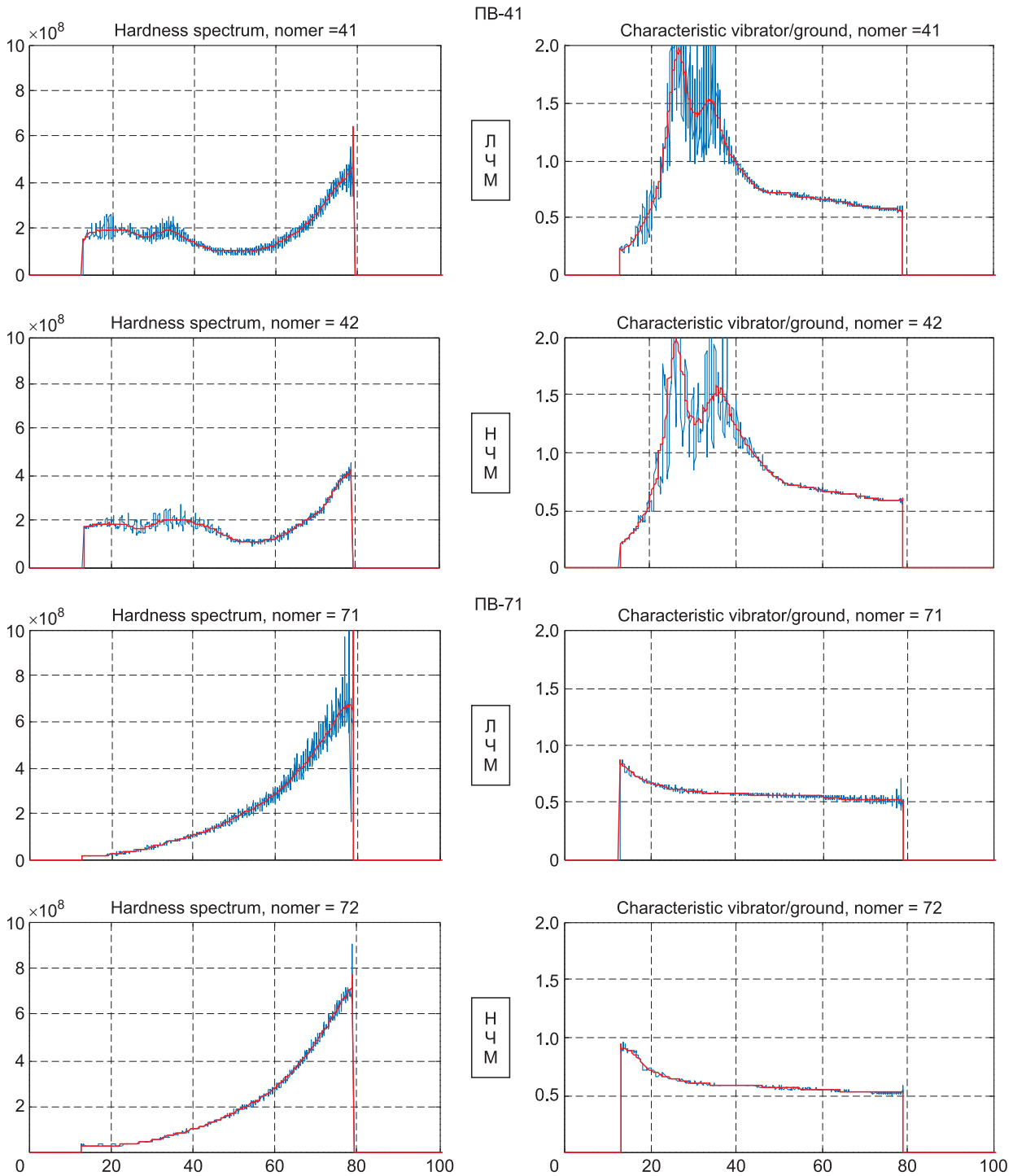


Рис. 3. Спектральные характеристики жесткости (Hardness) и системы вибратор–грунт на разных ПВ при пусках ЛЧМ- и НЧМ-свилов.

Эти характеристики практически не зависят от вида запускаемого сигнала на одном и том же ПВ.

$=BP(\omega)$ – спектр ускорения плиты, а $\omega^2 rm(\omega) = RM(\omega)$ – спектр ускорения инертной массы. В данном случае сигналы вибратора регистрировались акселерометрами, и для перехода от ускорений к перемещениям сигнал–ускорение должен был делиться на ω^2 . Тогда уравнение (2) для ускорений имеет вид

$$-mBP(\omega) + k(\omega)BP(\omega)/\omega^2 = MRM(\omega),$$

$$\text{или } k(\omega)BP(\omega) = \omega^2 GF(\omega). \quad (3)$$

Спектр управляющего (задающего) механического сигнала $s(\omega)$ связан с перемещениями плиты $bp(\omega)$ и инертной массы $rm(\omega)$ соотношением

$$s(\omega) = rm(\omega) - bp(\omega). \quad (4)$$

Зарегистрировав ускорения плиты и массы согласно уравнению (2), можно вычислить жесткость системы плита–среда – $k(\omega)$:

$$k(\omega) = m\omega^2 + M\omega^2 RM(\omega)/BP(\omega), \quad (5)$$

откуда, учитывая уравнение (3), получим отношение $g(\omega) = BP(\omega)/S(\omega)$ – частотную характеристику условий установки вибратора, или

$$g(\omega) = BP(\omega)/S(\omega) = \omega^2 M / (k(\omega) - \omega^2(m+M)). \quad (6)$$

Считая, что спектр сигнала (силы) $R(\omega)$, излучаемого вибратором, равен произведению $k(\omega)*bp(\omega)$, то с учетом равенств (3) и (4) получим

$$R(\omega) = k(\omega)*bp(\omega) = \omega^2 Ms(\omega)k(\omega) / (k(\omega) - \omega^2(m+M)). \quad (7)$$

Коэффициент B перехода от $rm(\omega)$ к $s(\omega)$: $s(\omega) = B*rm(\omega)$, тогда

$$B = s(\omega)/rm(\omega) = (rm(\omega) - bp(\omega))/rm(\omega)$$

$$\text{или } B*g(\omega) = bp(\omega)/rm(\omega). \quad (8)$$

Условия возбуждения – это свойства системы вибратор–грунт на ПВ, и они не должны зависеть от вида возбуждаемых сигналов.

На рис. 3 приведены примеры результатов вычислений жесткости $k(\omega)$ и условий возбуждения $g(\omega)$. Сходство кривых $k(\omega)$ или $g(\omega)$ в разных пусках (свилов – ЛЧМ и адаптивного НЧМ) на каждом ПВ очень близкое. Различия могут объясняться сменой режима работы вибратора (от ЛЧМ к НЧМ). Следовательно, можно утверждать, что на каждом ПВ вид $k(\omega)$ или $g(\omega)$ почти постоянный и мало зависит от вида задаваемого сигнала, т. е. $k(\omega)$ и $g(\omega)$ отображают именно условия возбуждения на ПВ.

На рис. 3 жесткость зависит от частоты, но на каждом ПВ по-своему, причем кривая обычно монотонно возрастает с увеличением частот, но бывают случаи не монотонных зависимостей (например, на ПВ-41, см. рис. 3). Амплитудные спектры характеристик условий возбуждения более разнообразны по форме: бывают и монотонно возрастающие, и почти постоянные, но чаще – выпуклые или с максимумом в диапазоне 20–40 (45) Гц.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ ВИБРАТОРА

Районирование площади по атрибутам сигналов.

1. Компенсация изменений условий возбуждения, для стабилизации свойств сейсмических сигналов, которые “освещают” разрез под ЗМС или, по крайней мере, ниже “присоединенной массы” вибратора.

2. Распределение по площади мощности волн-гармоник, возникающих при возбуждении вибросейсмических сигналов – чтобы использовать их для установления связи фона гармоник с наличием залежей углеводородов.

3. Распределение по площади параметров жесткости системы вибратор–грунт, которые могут представлять интерес для строительства.

Адаптация вибросигналов для бескабельных систем. Адаптивная технология АВИСейс [Жуков, Шнерсон, 2000] предполагает в процессе работ регистрацию на расстановке сейсмографов результатов посылки вибросигналов и их анализ до любых интересующих нас глубин. В случае использования бескабельных систем регистрации, именно таких, при которых нельзя оперативно анализировать сейсмический материал (Scout, Geospase, Fairfieldnodal), адаптация сигналов тоже возможна с помощью использования сигналов вибратора, но она ограничивается только поверхностными условиями возбуждения. Однако ее достоинство состоит в том, что адаптация к условиям возбуждения может производиться на самом вибраторе. Это позволяет повысить производительность работ.

Помимо адаптации к условиям возбуждения для повышения качества сейсмических работ необходимо учесть еще характер затухания сейсмической энергии с глубиной, который по латерали может изменяться незначительно в пределах площади работ, отрабатываемой за один сезон, и будет оценен на основании результатов предшествующих работ, в том числе по технологии АВИСейс.

Сигнал, компенсирующий затухание сейсмической энергии ниже ЗМС, – $SR(t)$ со спектром $SR(\omega)$ – считаем “исходным”. Для адаптации к изменяющимся поверхностным условиям на каждом ПВ в результате посылки настроенного сигнала, например ЛЧМ, по сигналам вибратора определяем частотную характеристику условий возбуждения $g(\omega)$ и получаем спектр оптимального на данном ПВ сигнала $S0(\omega)$

$$S0(\omega) = SR(\omega)/g(\omega), \quad (9)$$

компенсирующего частотно-зависимое затухание и условия возбуждения на данном ПВ. Функция $g(\omega)$ получена из уравнения (6).

Адаптация к поверхностным условиям возбуждения, очевидно, должна производиться на каждом ПВ, поскольку условия возбуждения обычно изменяются довольно часто и по местности, и по погоде.

ВЫВОДЫ

1. Сигналы с опорной плиты и инертной массы вибратора нужны не только для автоматического управления его работой, но и для получения информации об условиях возбуждения сейсмического сигнала на месте установки вибратора, в частности, для получения спектральных характеристик условий возбуждения и жесткости системы вибратор–грунт.

2. Сигналы вибратора на каждом ПВ дают информацию об изменении спектральных характеристик возбуждения по площади работ, что может быть использовано в методике наблюдений и при их обработке.

3. Сигналы вибратора могут быть также применены для улучшения корреляционной обработки виброграмм, используя в качестве оператора корреляции

сигнал Ground Force во всем частотном диапазоне, включая волны-гармоники.

4. Сигналы вибратора позволяют реализовать адаптацию вибросейсмического сигнала к меняющимся условиям возбуждения, в т. ч. при наблюдениях с помощью *бескабельных* систем.

5. Волны-гармоники, оцениваемые по сигналам вибратора, могут быть использованы при выделении нелинейных сейсмических явлений, связанных с геологической средой, а не с системой возбуждения.

Литература

Жуков А.П., Шнеерсон М.Б. Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки. М.: Недра, 2000.

Жуков А.П., Колесов С.В., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б. Сейсморазведка с вибрационными источниками. Тверь: ГЕРС, 2011.

Кузнецов В.В., Осауленко В.И. Авторское свидетельство № 744398 кл. G 01 V 1/00. Заявлено 12.04.76, опубл. 30.06.80, бюлл. № 24.

Кузнецов В.В., Осауленко В.И. Определение спектральной характеристики условий установки поверхностных невзрывных источников // Разведочная геофизика. 1981. Вып. 92. С. 77–82.

Чичинин И.С. Вибрационное излучение сейсмических волн. М.: Недра, 1984.

Schrodt J.K. Techniques for improving vibroseis data // Geophysics. 1987. V. 52, N 4. P. 469–482.

*Поступила 7 мая 2015 г.,
в окончательном варианте 5 июня 2015 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

КОЛЕСОВ Сергей Васильевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник ООО “Геофизические системы данных”.

ЖУКОВ Александр Петрович – доктор технических наук, профессор МГУ им. М.В. Ломоносова, директор ООО “Геофизические системы данных”.