



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАРМОНИК ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ВОЛН В ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ. ЧАСТЬ 1

М.С. Денисов¹, М.Б. Шнеерсон²

¹ООО «ГЕОЛАБ», 119071, Москва, ул. Орджоникидзе, 12/4, Россия,
e-mail: denisovms@gmail.com

²РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 119991, Москва, Ленинский пр., 65, Россия,
e-mail: shneer@bk.ru

Возбуждение колебаний в вибрационной сейсморазведке сопровождается появлением гармоник, т. е. волн с кратными относительно основных частотами. Традиционно они относились к помехам, и предпринимались усилия для их подавления. Однако со временем стало понятно, что они могут быть использованы для расширения спектрального состава сигнала. Известны два способа обработки с учетом гармоник. Один основан на повторной корреляции исходных данных, другой реализуется в виде корреляции вибрационных записей с комбинированным управляющим сигналом, рассчитанным на одновременное выделение основных волн и гармоник. Оба подхода имеют свои преимущества и недостатки. В первой части статьи предложена параметрическая модель сигнала сложного вибровоздействия и описан оптимизационный алгоритм расширения спектрального состава зарегистрированных волн.

Вибрационная сейсморазведка, корреляция, гармоники, сложный сигнал, спектральный состав

UTILIZATION OF HARMONICS TO BROADEN THE BANDWIDTH IN VIBROSEISMIC. PART 1

M.S. Denisov¹, M.B. Shneerson²

¹GEOLAB Ltd, Ordzhonikidze str., 12/4, Moscow, 119071, Russia,
e-mail: denisovms@gmail.com

²RSU of oil and gas, Leninsky prosp., 65, Moscow, 119991, Russia,
e-mail: shneer@bk.ru

The excitation of waves in vibration seismic is accompanied by the appearance of harmonics, i.e. the waves with multiple frequencies relative to the fundamental frequencies. Traditionally harmonics were recognized as noise and essential effort was devoted to remove them. Later understanding of their usefulness to broaden the bandwidth of the correlated vibroseis waves has come. Two approaches to utilize the energy of harmonics are known. The first one implies two or more successive correlations. The second – correlating the vibroseis records with a single complex sweep contacting both the fundamental frequencies and the harmonics. Both methods have got their advantages and drawbacks. In the first part of the paper we will suggest a parametric model of the complex sweep and derive a optimization-based procedure to estimate the unknown parameters. This enables broadband spectrum processing.

Vibroseis, correlation, harmonics, complex signal, spectral band

ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных направлений развития вибрационной сейсморазведки является расширение спектрального состава возбуждаемых и регистрируемых волн, что оказывается необходимым условием повышения временной разрешенности сейсмических записей, точности инверсионных преобразований и корректности построения изображения глубинных объектов. В

настоящее время эта задача решается путем модернизации вибрационных источников и совершенствования методики полевых работ: увеличение «хода поршня» и массы плиты, применение управляющих сигналов (свигов) с расширенным частотным диапазоном, адаптивная вибросейсморазведка и др. [Wei, 2015; Zhukov et al., 2016].

В вибрационной сейсморазведке имеется еще один путь получения широкополосных записей, основывающийся на использовании энергии гармоник и субгармоник, которые практически всегда сопутствуют вибрационному возбуждению волн. Анализ работы вибраторов показывает, что усилие, передаваемое плитой излучателя грунту, имеет сложную форму с уровнем нелинейных искажений до 20–25 % на низких частотах. Это позволяет рассматривать силовое воздействие вибратора как композицию основного сигнала с заданным частотным диапазоном и сигналов субгармоник и гармоник с частотами, кратными исходным. Однако стандартная обработка вибрационных записей, основанная на корреляции полевых виброграмм с управляющим сигналом, не позволяет выделять и использовать энергию нелинейных компонент исходного волнового поля, так как их частоты не согласуются с частотным диапазоном свипа. Тем самым они фактически рассматриваются как помехи и подавляются. Если же проводить корреляцию исходных виброграмм в расширенной полосе частот с учетом нелинейных компонент волнового поля, то появляется возможность использовать их энергию для расширения спектрального состава зарегистрированных волн.

Задачи, которые нам предстоит решить, следующие:

1. Изучить природу нелинейных искажений, сопутствующих вибрационному возбуждению упругих волн, и предложить математическую модель этого эффекта.
2. На основании полученной модели проанализировать известные методики использования гармоник для расширения спектра сейсмического сигнала, выявив как их сильные стороны, так и недостатки.
3. Предложить новый способ расширения спектра сигнала, в котором преодолеваются указанные недостатки.

Дело в том, что известны два подхода, позволяющие расширять спектр импульса за счет энергии гармоник. Первый подразумевает отдельную корреляцию виброграмм вначале с основным свипом, а затем со свипами старших гармоник. Второй основан на получении формы сигнала искаженного вибровоздействия с последующей корреляцией виброграмм с этим сигналом. Наш опыт свидетельствует о том, что у значительного числа геофизиков отсутствуют единая концепция и однозначное понимание преимуществ и недостатков упомянутых подходов. Поэтому в настоящем исследовании мы постараемся внести в этот вопрос ясность, проведя их сравнительный анализ.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

Начало теоретических и экспериментальных исследований по изучению нелинейных явлений в регистрируемых волновых полях относится ко второй половине прошлого столетия, когда появились первые результаты работ с вибрационными источниками колебаний. Их анализ указывал на безусловное наличие нелинейных составляющих в наблюдаемых волновых полях [Жуков, Шнейерсон, 2000]. В последующих работах (см., например, [Логинов и др., 2012]) были проанализированы и показаны возможности и ограничения использования волн-гармоник для прослеживания глубинных границ раздела и прогноза наличия/отсутствия скоплений углеводородов в разрезе. Первые результаты были обнадеживающими, однако в силу различных причин эти исследования дальнейшего развития не получили. В последние годы возобновился интерес к волнам-гармоникам в связи с возможностью их использования для расширения спектрального состава волн в вибрационной сейсморазведке (см., например, [Pecholcs et al., 2008; Harrison et al., 2013]).

Возникновение нелинейных составляющих в волновых полях, возбуждаемых вибрационными источниками колебаний, обусловлены сложным характером взаимодействия рабочей плиты излучателя с грунтом при передаче ему переменных силовых нагрузок, которые обусловлены особенностями конструкции излучателей и характером поведения грунта при разнонаправленных нагрузках на среду. Плита со штоком, поршнем и гидроцилиндром (реактивная масса) образуют единую реактивную механическую систему, приводимую в движение внутренней переменной по величине силой. В результате поршень с плитой движутся в одну сторону, а реактивная масса – в другую. При этом, если последняя может свободно перемещаться вверх и вниз от центрального положения, то поршень с плитой

ограничены в своем движении сопротивлением грунта, так как вибратор, как правило, работает в режиме небольших (до 1,5–2,0 кг/см²) деформаций грунтового полупространства. При расчете конструкции вибраторов в качестве одного из параметров задается величина взаимного перемещения поршня и гидроцилиндра («ход поршня») на самой низкой рабочей частоте. В связи с тем, что ход поршня с ростом частоты уменьшается обратно пропорционально ее квадрату, то он выбирается значительным для того, чтобы и на высоких частотах взаимные перемещения поршня и гидроцилиндра имели заметные значения. Для многих сейсмических вибраторов этот параметр выбирается равным 4–5 см и во всех случаях превышает предел упругих деформаций грунта.

В результате инерционная масса свободно смещается вверх и вниз, а поршень с плитой ограничены в своем движении, что и приводит к искажению формы возбуждаемых колебаний, которое может рассматриваться как осложнение основного силового воздействия гармониками и субгармониками. Их уровень определяется ходом поршня и компрессионными характеристиками грунта. С увеличением частоты возбуждаемых колебаний амплитуды перемещения плиты уменьшаются и, начиная с какой-то частоты, вибратор начинает работать в режиме упругих деформаций пород. Это является одной из причин снижения уровня гармоник с ростом частоты.

На искаженный характер возбуждаемых вибратором силовых сигналов указывают экспериментальные данные, полученные при изучении процессов, протекающих при работе вибраторов. На рис. 1, взятом из сборника [Теория..., 1998], приведены кривые изменения давления в верхней и нижней полостях гидроцилиндра возбуждателя вибрации на частотах 17, 40 и 70 Гц (графики показаны в различном масштабе по горизонтальной оси). На них выделяются колебания основных частот и осложняющие их более высокочастотные колебания. На частоте 17 Гц имеет место асимметрия кривых давления. С повышением частоты интенсивность искажающих колебаний уменьшается, и кривые давления на частоте 40 Гц приобретают менее искаженный, а на частоте 70 Гц – квазигармонический характер. Следствием этого и является уменьшение уровня гармоник с ростом частоты возбуждаемых колебаний.

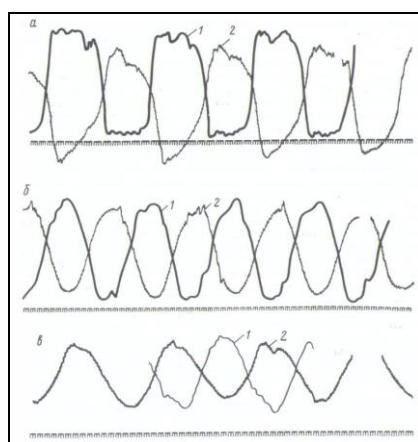


Рис. 1. Кривые изменения давления в верхней (1) и нижней (2) полостях вибровозбудителя на частотах 17 Гц (а), 40 Гц (б) и 70 Гц (в), иллюстрация из сборника [Теория..., 1998]

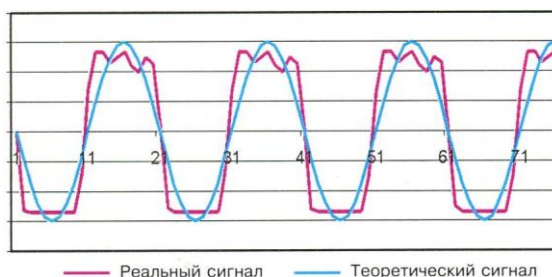


Рис. 2. Фрагменты реального и теоретического сигналов. По вертикальной оси отложены относительные амплитуды, по горизонтали – номера отсчетов

Другой характерный пример поведения реального монохроматического сигнала частоты 50 Гц приведен на рис. 2, где он сопоставлен с теоретическим сигналом. Очевидно, что реальный сигнал асимметричен и характеризуется наличием «полочек» (терминология, а также рис. 2 заимствованы из работы [Ведерников и др., 2001]). На наш взгляд, это свидетельствует о том, что воздействие силы на поверхность земли в фазе максимальной амплитуды воздействия происходит в режиме не линейной, а пластической деформации. В упомянутой статье Г.В. Ведерникова с соавторами приводится большое число иллюстраций как по монохроматическим, так и по свип-сигналам, полученным в различных условиях возбуждения и приема колебаний, и они косвенно подтверждают наше утверждение. В частности, при малых деформациях грунта, которые имеют место в начале работы вибратора при излучении низкочастотных компонент свипа, эффект искажения локальных максимумов и минимумов сигнала не наблюдался. Однако при выходе на режим максимальной мощности излучения регистрируемые смещения грунта имеют форму, характерную для неупругой деформации.

Эффект неупругого взаимодействия виброисточника с грунтом изучался в немногочисленных, но тщательных исследованиях. Так, Э.И. Машинский [1987] со ссылкой на работы Ю.И. Васильева и его сотрудников (см., например, [Васильев и др., 1969]) утверждает, что при вибровоздействии даже в случае так называемых малых деформаций, хотя остаточные деформации отсутствуют, но воздействие на среду оказывается неупругим. Кроме того, «исследование даже простых по строению кристаллов показывает наличие в них заметных неупругих эффектов при действии не слишком больших напряжений и деформаций». Известны экспериментальные подтверждения отклонения колебаний, вызванных виброисточником, от закона Гука [Геза и др., 2004]. Понятно, что применяемое на практике уплотнение грунта, проводимое перед началом вибрационной сейсморазведки, позволяет ослабить явления неупругости, но не избавиться от них. Рассуждая о диаграмме пластичности для грунтов и горных пород, И.М. Горькова [1965] указывает, что у некоторых материалов отклонения от закона Гука начинаются при очень маленьких напряжениях или даже линейный участок на диаграмме вообще отсутствует. В работе [Авербах и др., 2008] содержится достаточно полный библиографический список русскоязычных и англоязычных публикаций по теме неупругого воздействия виброисточника на грунт.

Нам известно, что существуют и альтернативные объяснения наблюдаемых искажений формы сигнала, например, [Циммерман, 1987]. Здесь мы оставляем их вне нашего рассмотрения не только потому, что работа посвящена другим проблемам вибрационного метода, но и ввиду того, что приведенные нами аргументы хорошо согласуются с результатами реальных наблюдений. Более того, алгоритм обработки сигнала с учетом гармоник, который будет предложен ниже, вообще не зависит от принятия той или иной гипотезы.

Здесь, несколько отвлекаясь от линии изложения, мы считаем уместным сделать замечание относительно терминологии. Обсуждаемые в рамках настоящего исследования проблемы обобщенно называют «нелинейными эффектами», причем как в отечественной, так и в зарубежной литературе. Так как среди сейсморазведчиков отсутствует единое толкование понятия *нелинейности* в отношении интересующей нас задачи, то мы считаем целесообразным привести соответствующий комментарий. Под «нелинейностью» очень часто понимают простые осложнения формы сейсмического импульса, которые, строго говоря, вполне корректно описываются в рамках линейных волновых уравнений, и нет нужды привлекать принципы нелинейной теории упругости [Лурье, 1980]. Термин *нелинейность* здесь мы используем, чтобы указать на возможные элементы неупругого, осложненного взаимодействия источника колебаний с грунтом, которые приводят к искажению распространяющегося в среде силового сигнала. Они могут возникать при работах на «мягких» грунтах, а также в моменты пиковых, максимальных нагрузок, превышающих предел упругости грунта, с выходом за пределы линейного сегмента компрессионной кривой (или – *диаграммы пластичности*).

На рис. 3 представлена типичная диаграмма пластичности, составленная хотя и не для горных пород, но по которой можно отследить основные принципы деформации твердых тел под влиянием внешней силы. На графике нас интересуют только участки *OA* и *AB – BC*. Сегмент *OA* соответствует упругой линейной деформации, описываемой законом Гука. Очевидно, что и уравнение, связывающее напряжение и деформацию на этом участке, линейно. После прохождения точки предела упругости *A* деформация становится *пластической* и график смещений, характеризуемый наличием так называемой площадки текучести *BC*, уже не может быть аппроксимирован линейной функцией.

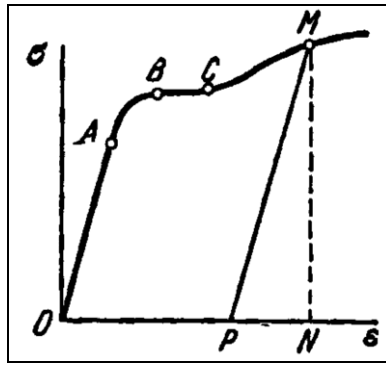


Рис. 3. Диаграмма пластичности: зависимость относительной деформации σ от напряжения ε . На участке OA деформация линейна и описывается законом Гука. На участке $AB - BC$ деформация нелинейна. Плоский отрезок BC – площадка текучести (рисунок заимствован из учебника по сопротивлению материалов [Работнов, 1962])

Поэтому такие вынужденные деформации можно назвать *нелинейными*: как следует из графика, уравнение упругости становится нелинейным. Именно эти эффекты наблюдаются на показанных выше реальных сигналах.

В процессе распространения от источника в глубь среды волна быстро теряет амплитуду из-за расхождения ее фронта. Уже на относительно небольшом расстоянии от источника смещения оказываются настолько малыми, что деформация находится в пределах линейного сегмента. Дальнейшее распространение волны, включая отражение от глубинных границ, описывается классической теорией упругих волн [Подъяпольский, 1966]. Таким образом нелинейные эффекты лишь определяют форму сейсмического импульса, осложняя ее и делая непохожей на теоретический свип-сигнал или моносигнал, что затрудняет его корреляционную обработку. Однако при этом описание всех наблюдаемых волновых процессов корректно реализуется в рамках классической линейной теории распространения упругих волн. Это дает основания геофизику применять традиционные алгоритмы обработки и интерпретации данных, основанные на линейных концепциях.

МОДЕЛЬ СИГНАЛА С УЧЕТОМ ГАРМОНИК

Многие исследователи (см., например, [Циммерман, 2004]) указывали на несимметричность взаимодействия плиты с грунтом. В самом деле, виброустановка способна оказывать воздействие на грунт в виде давления, но не растяжения. Этот принцип подтверждается следующим теоретическим анализом.

Предположим, что вибратор возбуждает монохроматический сигнал, частота которого равна условной единице. (Разумеется, мы отдаем себе отчет в заведомой неточности используемых здесь формулировок, в том числе, в термине *монохроматический* применительно к финитному сигналу [Финк, 1984].) Эффект пластичности будем учитывать, применяя на амплитуду сейсмического импульса пороговые ограничения P_1 и P_2 , соответствующие пределу упругости. Несимметричность воздействия вводится путем выбора различных (т. е. не равных друг другу: $|P_1| \neq |P_2|$) пороговых значений для деформации растяжения и сжатия. Таким образом, распространяющийся в глубь среды сейсмический импульс описывается функцией

$$h(t) = \begin{cases} \sin t, t \in (0, \pi), \sin t \leq P_1 \\ P_1, t \in (0, \pi), \sin t > P_1 \\ \sin t, t \in (\pi, 2\pi), \sin t \geq P_2 \\ P_2, t \in (\pi, 2\pi), \sin t < P_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где

$$0 \leq P_1 \leq 1 \text{ и } 0 \geq P_2 \geq -1. \quad (2)$$

Получим амплитудно- и фазо-частотные характеристики такого вибросигнала. С этой целью требуется посчитать коэффициенты разложения периодической функции (1) в ряд Фурье [Привалов, 2011], интегрируя ее на интервале периодичности:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} h(t) \sin ntdt, \quad (3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} h(t) \cos ntdt, \quad (4)$$

где n – целое число, $n = 1, 2, \dots$. Подставив (1) в (3), получим

$$a_n = \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^{\arcsin(P_1)} \sin t \sin ntdt + \int_{\arcsin(P_1)}^{\pi - \arcsin(P_1)} P_1 dt + \int_{\pi - \arcsin(P_1)}^{\pi - \arcsin(P_2)} \sin t \sin ntdt + \int_{\pi - \arcsin(P_2)}^{2\pi + \arcsin(P_2)} P_2 dt + \int_{2\pi + \arcsin(P_2)}^{2\pi} \sin t \sin ntdt \right\}. \quad (5)$$

Для вычисления интегралов, фигурирующих в (5) в фигурных скобках, воспользуемся таблицами [Градштейн, Рыжик, 1962], откуда имеем

$$\int \sin t \sin ntdt = \frac{\cos t \sin nt - n \sin nt \cos t}{n^2 - 1}.$$

Аналогичное равенство получим, подставляя (1) в (4) и выписывая формулы из таблиц. В результате приходим к крайне громоздким выражениям, которые здесь по понятным причинам не приводятся.

Результаты вычислений подтверждаются численным расчетом амплитудно-частотной характеристики сигнала (1) частоты 20 Гц при выборе параметров $P_1=0,7$, $P_2=-0,4$, реализованным в виде преобразования Фурье достаточно протяженной его реализации (рис. 4). Из рисунка следует, что смоделированные искажения порождают как четные, так и нечетные гармоники всех порядков. Субгармоники отсутствуют. Третья гармоника интенсивнее второй гармоники, а суммарная амплитуда только второй и третьей гармоник достигает 35 % от амплитуды основной частоты сигнала. Эти особенности с высокой степенью точности согласуются с результатами многочисленных полевых экспериментов, проведенных очень тщательно и в разнообразных условиях контакта плиты вибратора с грунтом, которые описаны в упомянутой работе Г.В. Ведерникова с соавторами.

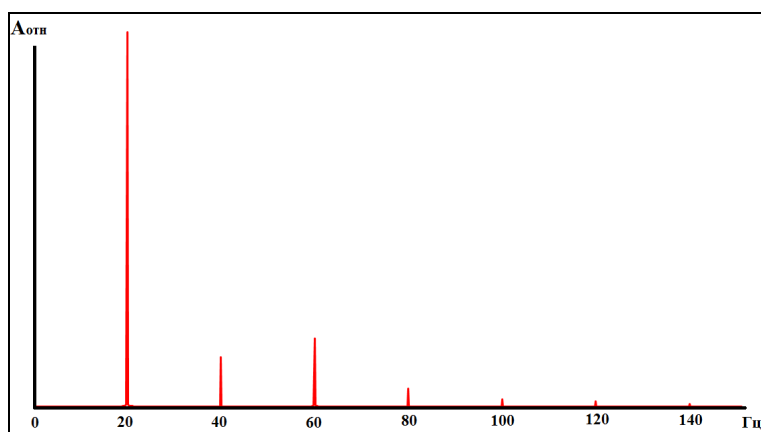


Рис. 4. Амплитудный спектр (в линейном масштабе) модельного сигнала, полученного в результате несимметричного силового воздействия на среду с учетом эффекта пластической деформации

На практике наряду с гармониками могут наблюдаться и субгармоники, появление которых может быть обусловлено как искажениями силовых сигналов при их излучении, так и эффектом ограниченной по амплитуде суперпозиции двух монохроматических воздействий. Здесь мы не будем вдаваться в детали вывода математической модели указанного явления, отсылая любознательного читателя за этим выводом к книге [Гоноровский, 1986], и приведем лишь окончательный результат. Пусть сигнал $r(t)$ состоит из двух гармонических колебаний, отличающихся друг от друга по частотам (ω_a и ω_b , $\omega_b > \omega_a$) и амплитудам (a и b):

$$r(t) = a \sin(\omega_a t) + b \sin(\omega_b t),$$

и пусть введено пороговое ограничение

$$h(t) = \begin{cases} r(t), & r(t) \leq P \\ P, & r(t) > P \end{cases} \quad (6)$$

Так как это не приводит к путанице, то здесь и в дальнейшем мы используем одни и те же обозначения: $r(t)$ – «расчетный» сигнал, $h(t)$ – его аналог, пиковые амплитуды которого ограничены пороговым значением.

Полученное воздействие $h(t)$ наряду с частотами ω_a и ω_b будет содержать частоту $\omega_b - \omega_a$. Например, при $\omega_a = 0,16\pi$, что тождественно частоте 40 Гц при частоте Найквиста 250 Гц и $\omega_b = 0,28\pi$, что составляет 70 Гц, будет наблюдаться субгармоника на частоте 30 Гц. Такое явление также известно в теории акустики и теории музыкальных звуков, где оно связывается с проявлением двух гармонических воздействий повышенной интенсивности и получило название *объективных комбинационных тонов* или *тонов Тартини* [Гельмгольц, 2013].

Кроме того, считаем важным отметить, что в многочисленных производственных и опытных работах с вибраторами, проведенных в различных условиях возбуждения и приема колебаний, субгармоники в результате монохромного воздействия не наблюдались, что мы рассматриваем как одно из подтверждений нашей гипотезы о природе этих эффектов.

О ПОСТРОЕНИИ АЛГОРИТМОВ КОРРЕЛЯЦИИ ПО КРАТНЫМ ГАРМОНИКАМ

Пусть сигнал виброисточника $h(t)$ имеет спектральную характеристику $|H(\omega)|e^{j\varphi(\omega)}$, где $|H(\omega)|$ – амплитудный спектр, $\varphi(\omega)$ – фазовый спектр, ω – циклическая частота, $j = \sqrt{-1}$.

При обработке вибросейсмических данных обычно применяют корреляцию трасс со свипом, что обеспечивает сжатие сигналов и, как следствие, повышение их разрешающей способности. Как известно [Козлов и др., 1973], если специальным образом при построении фильтра не учитывается влияние аддитивного шума (а оно почти никогда не учитывается), то корреляция тождественна применению согласованной фильтрации, оператор которой имеет спектральную характеристику

$$G^{(C)}(\omega) = |H(\omega)|e^{-j\varphi(\omega)}. \quad (7)$$

Можно показать [Гольдин, 1974], что амплитудный спектр линейно-частотно модулированного (ЛЧМ) сигнала равен единице в рабочем диапазоне частот, поэтому и амплитудно-частотная характеристика согласованного фильтра равна единице:

$$G^{(C)}(\omega) = e^{-j\varphi(\omega)}. \quad (8)$$

Таким образом, корреляционное преобразование виброграмм сводится к фазовой фильтрации, т. е. к коррекции их фазовых спектров с целью приведения к нуль-фазовому виду. Именно поэтому в дальнейшем наше основное внимание будет сосредоточено на фазовых характеристиках сигналов.

При обработке виброграмм вместо корреляции иногда применяют деконволюцию [Шехтман, Кузнецов, 2005а], оператор которой имеет спектральную характеристику

$$G^{(D)}(\omega) = \frac{1}{|H(\omega)|} e^{-j\varphi(\omega)}. \quad (9)$$

Так как в нашей задаче $|H(\omega)| \equiv 1$, то

$$G^{(D)}(\omega) = e^{-j\varphi(\omega)},$$

что совпадает с (8).

Тем самым каждый из этих операторов преобразует теоретический вибросигнал в нуль-фазовый импульс. Известно (см., например, [Варакин, 1970; Berkhout, 1974]), что для фиксированного сигнального диапазона частот разрешающая способность импульса зависит (обратно пропорционально), в первую очередь, от модуля максимального значения второй производной его фазового спектра и почти не зависит от формы амплитудного спектра. Получаемый в результате обработки нуль-фазовый импульс характеризуется нулевым значением второй производной фазового спектра, поэтому он обладает наилучшей разрешающей способностью, и его энергия максимально сконцентрирована в окрестности центральных отсчетов (нулевого времени).

Подкрепим наши рассуждения о первостепенной важности фазы вибросигнала мысленным экспериментом. Игнорируя фазовый спектр опорного свипа, т. е. положив его равным нулю, применим согласованный фильтр (7) к виброграмме. Амплитудный спектр такого фильтра равен единице в рабочем диапазоне частот, поэтому временная характеристика оператора совпадает с полосовым фильтром. Очевидно, что полосовая фильтрация трассу не изменит, и на выходе согласованной фильтрации получим исходную виброграмму.

Таким образом, проблема фазовой характеристики сейсмического сигнала оказывается наиболее важной. В самом деле, вибросигнал имеет сложный фазовый спектр [Гольдин, 1974], который хорошо аппроксимируется параболой и характеризуется большим значением модуля второй производной. Поэтому свип-сигнал обладает крайне низкой разрешающей способностью.

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ ПРОЦЕДУРА ОЦЕНИВАНИЯ ФОРМЫ ИСКАЖЕННОГО СВИП-СИГНАЛА

Здесь, в первой части статьи, нас будет интересовать алгоритм, в котором вибровоздействие на грунт рассматривается не как набор отдельных гармоник для последующей раздельной корреляции с каждой из них, а как цельный сигнал сложной формы, и именно он используется для согласованной фильтрации или деконволюции. Понятно, что для реализации такого подхода вначале требуется получить оценку сигнала. Разработка методики получения оценки ведется по двум направлениям. Первое связано с измерением реального вибросигнала в полевых условиях и у отечественного геофизика оно, наверное, ассоциируется с работой [Шехтман, Кузнецов, 2005а]. Трудности, сопутствующие таким измерениям, хорошо известны, и мы здесь на них останавливаться не будем. Методика работ постепенно совершенствуется, и мы надеемся, что это приведет к получению убедительных результатов обработки реальных данных.

Второе направление, которое разрабатывается в рамках настоящего исследования, подразумевает создание математической модели сложного вибровоздействия с учетом кратных гармоник и использование его для сжатия вибросейсмических записей. К описанию соответствующего алгоритма мы теперь приступаем. Нелинейные эффекты пластической деформации и несимметричного воздействия плиты на грунт уже нами описаны. На практике будем считать, что модель вибросигнала известна с точностью до параметров, которые мы объявим искомыми и будем разрабатывать способ получения их оценок. Сразу оговоримся, что мы осознаем возможные ограничения нашего метода. В числе его преимуществ мы видим то, что он похож на традиционный подход, когда, несмотря на отличие излучаемых вибратором сигналов от свипа, геофизик использует его при корреляции, рассчитывая на то,

что основные искажения фазового (и отчасти амплитудного) спектра реального вибровоздействия будут скомпенсированы. Остаточные искажения можно устранить средствами хорошо знакомой статистической деконволюции, способной преобразовать относительно несложный сигнал в нуль-фазовый импульс с равномерным в сигнальной полосе частот амплитудным спектром.

С целью получения эффективной и компактной параметризации сигнала реального вибровоздействия с учетом эффекта пластической деформации при пиковой нагрузке по аналогии с выражениями (1) и (6) мы можем ввести следующую параметризацию: если $r(t)$ – расчетный свип-сигнал, то

$$h(t) = \begin{cases} r(t), P_1 \leq r(t) \leq P_2 \\ P_2, r(t) < P_2 \\ P_1, r(t) > P_1 \end{cases} . \quad (10)$$

Так как все параметры опорного свипа $r(t)$ нам известны, то форма посылаемого в среду колебания $h(t)$ на практике будет определена с точностью до двух неизвестных коэффициентов P_1 и P_2 , причем, как и прежде:

$$0 \leq P_1 \leq 1 \text{ и } 0 \geq P_2 \geq -1. \quad (11)$$

Фактически, таким способом вводится компактная и удобная параметризация сигнала реального воздействия. Тогда обработка с учетом кратных гармоник включает в себя три этапа. На первом производится оценивание неизвестных величин P_1 и P_2 . На втором они подставляются в формулу (10) для последующего расчета оператора согласованной фильтрации (7) или деконволюции (9), на выбор геофизика-обработчика. На завершающем этапе оператор применяется к данным. Способ реализации второго и третьего этапов очевиден, и нам остается лишь предложить алгоритм оценивания параметров по исходным записям.

При записи хорошо известной статистической сверточной модели сейсмической трассы $z(t)$ [Справочник геофизика, 1981]

$$z(t) = l(t) * s(t), \quad (12)$$

где $s(t)$ – импульс, $l(t)$ – последовательность коэффициентов отражения (для простоты мы игнорируем фактор аддитивного шума), подразумевается, что $l(t)$ является реализацией стационарного эргодического случайного процесса типа белого шума. На основании теоремы о свертке [Оппенгейм, Шафер, 1979] от (12) переходим к спектральному эквиваленту этого выражения

$$Z(\omega) = L(\omega)S(\omega), \quad (13)$$

где заглавные буквы использованы для обозначения спектральных характеристик функций, соответственно обозначенных в (12) строчными буквами. Как следует из (13), для амплитудных спектров справедливо равенство

$$|Z(\omega)| = |L(\omega)||S(\omega)|.$$

Обозначим через μ^2 дисперсию случайного процесса l . Для достаточно протяженного фрагмента трассы функция $|L(\omega)|$, являясь состоятельной оценкой квадратного корня энергетического спектра процесса типа белого шума [Отнес, Эноксон, 1982], обладает свойством $|L(\omega)| \approx \mu$. Таким образом

$$|Z(\omega)| \approx \mu|S(\omega)|. \quad (14)$$

К последнему равенству также можно прийти на основании теоремы Кэмпбелла [Рапопорт, 1973]. Полученный результат означает, что с точностью до множителя амплитудный спектр трассы совпадает с

амплитудным спектром сейсмического импульса. Однако нас интересует также и фазовый (фазовый – даже в первую очередь) спектр импульса. На основании (14) и введенной параметризации (10) и (11) легко перейти к алгоритму оценивания искомым коэффициентов. Будем искать такие P_1 и P_2 , которые с точностью до коэффициента масштаба обеспечат максимальное подобие функций $|H(\omega, P_1, P_2)|$ и $|Z(\omega)|$. Спектральную характеристику $|H(\omega, P_1, P_2)|$ получим, применив преобразование Фурье к сигналу (10). В качестве меры подобия удобно использовать аналог коэффициента взаимной корреляции, записанный для детерминированных функций в виде нормированного скалярного произведения

$$J(P_1, P_2) = \frac{\int_0^{\pi} (|H(\omega, P_1, P_2)| - \bar{H})(|Z(\omega)| - \bar{Z}) d\omega}{\sqrt{\int_0^{\pi} (|H(\omega, P_1, P_2)| - \bar{H})^2 d\omega} \sqrt{\int_0^{\pi} (|Z(\omega)| - \bar{Z})^2 d\omega}}, \quad (15)$$

где \bar{H} и \bar{Z} – средние значения функций H и Z на интервале интегрирования $\omega \in (0, \pi)$, а область поиска искомым параметров определяется неравенствами (2).

В теории статистики похожее выражение принято называть коэффициентом корреляции Пирсона [Ван дер Варден, 1960]. Одним из его полезных свойств является возможность сравнения функций независимо от их масштаба, т. е. нам не придется оценивать дисперсию μ . Очевидно, что глобальный минимум функционала (15) достигается на истинных параметрах P_1, P_2 .

Если рассматривать описанный алгоритм с позиций амплитудно- и фазо-частотных характеристик вибровоздействия и оператора согласованной фильтрации, то его следует интерпретировать следующим образом. Получив по сейсмической трассе оценку амплитудного спектра импульса и восстановив по ней искомым параметры, вычислим форму сложного сигнала с учетом гармоник. Фазовая характеристика этого сигнала во всем диапазоне частот будет корректно согласована с его амплитудным спектром, тем самым задача построения согласованного фильтра решена.

Приведем пример использования такой процедуры. С этой целью была смоделирована сейсмическая трасса как результат свертки фрагмента реализации белого шума и сигнала виброисточника, описываемого выражением (10). Параметры свип-сигнала $r(t)$: диапазон частот 10–60 Гц, линейное сглаживание краев по 10 % от общей длины. Сигнал осложнен кратными гармониками в соответствии с правилом (1) при $P_1=0,7, P_2=-0,4$. На рис. 5 показан амплитудный спектр этого сигнала. Изображенный спектр имеет осцилляции, которые могут вызвать недоумение у читателя. Аналогичные осцилляции мы будем наблюдать всюду, где будем иметь дело с амплитудно-частотными характеристиками сигналов, претерпевших нелинейные искажения. Их природа подробно исследуется во второй части статьи.

В результате оценивания неизвестных параметров по фрагменту сейсмической трассы были получены значения, близкие к истинным P_1 и P_2 . Эти параметры были использованы для расчета характеристики согласованного фильтра, и результат фильтрации, примененный к изолированному импульсу сложного вибровоздействия, показан на рис. 6, а (амплитудный спектр – на рис. 6, б). Центральная часть полученного сигнала представлена отдельно на рис. 6, в (амплитудный спектр этой части – на рис. 6, г). Очевидно, что ожидаемый эффект достигнут и сигнал виброисточника, характеризуемый наличием интенсивных кратных гармоник, успешно сфокусирован в нуль-фазовый сигнал.

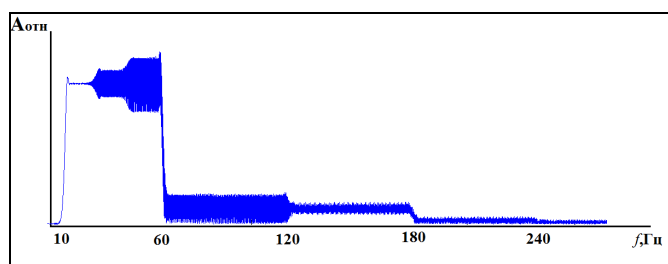


Рис. 5. Амплитудный спектр сложного сигнала, заданного в диапазоне частот 10–60 Гц. Горизонтальная ось частот отложена в герцах, вертикальная – в относительных амплитудах

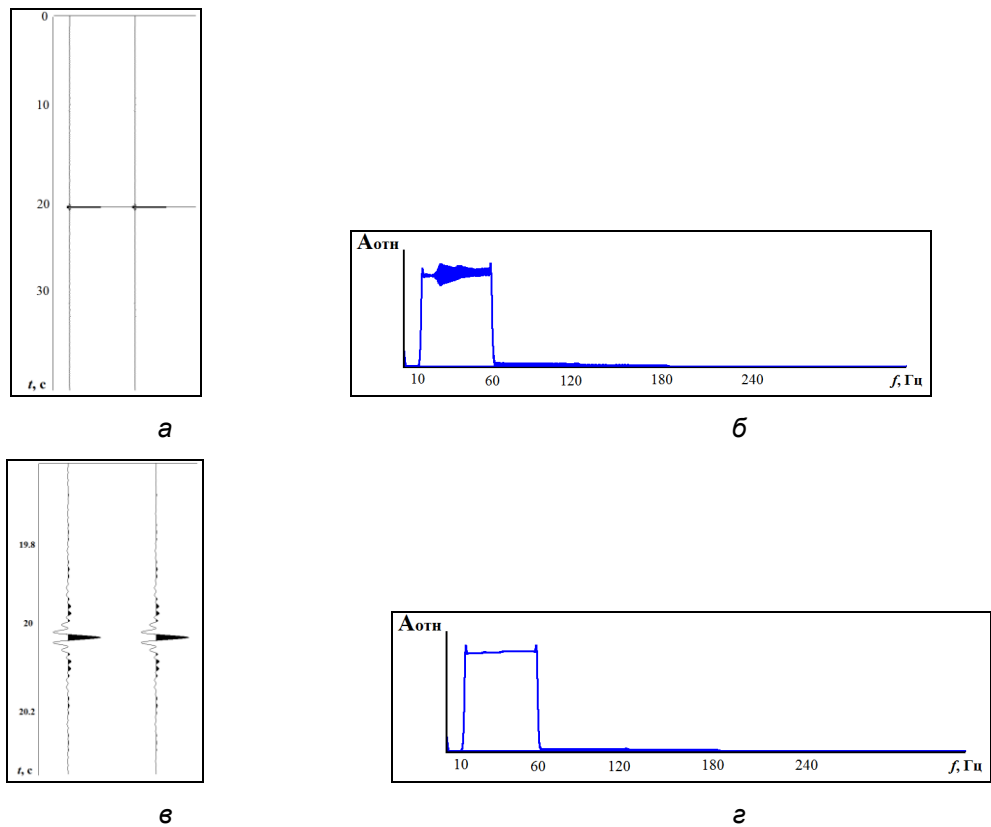


Рис. 6. Корреляция сигнала сложного вибровоздействия по оценке параметризованного свип-сигнала: а – сигнал, полученный в результате корреляции; б – амплитудный спектр, полученный по целому сигналу; в – центральный импульс сигнала; г – амплитудный спектр центрального импульса

Сопоставляя амплитудные спектры на рис. 5 и рис. 6, б, можно увидеть, что последний имеет минимум энергии высокочастотных компонент. Это объясняется свойствами примененных преобразований. Если при корреляции по второй гармонике согласованный фильтр имеет равномерный амплитудный спектр в диапазоне частот 20–120 Гц, а при корреляции по третьей гармонике 30–180 Гц, то при корреляции с полученной оценкой сигнала сложного вибровоздействия амплитудный спектр последнего фактически возводится в квадрат. Низкочастотная часть спектра при этом лучше сохраняется (как следует из рис. 6, б, сигнальный диапазон частот результата корреляции расширен и насыщен энергией вплоть до 10 Гц), но высокочастотные компоненты неизбежно ослабевают.

Очевидно, что метод согласованной фильтрации (7) и не предназначен для выравнивания амплитудного спектра. Если требуется не только скомпенсировать фазовый спектр сигнала, но и получить результат с плоским в заданном диапазоне частот амплитудным спектром, то следует применять оператор деконволюции (9). Предложенный нами алгоритм при этом почти не изменится. Полученные статистические оценки параметров сложного свип-сигнала будут использованы для расчета его амплитудного и фазового спектров, после чего эти характеристики подставляются в формулу (9). Затем оператор деконволюции применяется к сейсмическим трассам. Также оценки параметров можно использовать для получения временной характеристики сложного свипа, после чего применить сигнатурную деконволюцию. Мы намеренно не вдаемся в детали реализации алгоритма и не обсуждаем его особенности, так как это представляет собой отдельную и весьма обширную тему, которой посвящаются специальные исследования, например, [Шехтман, Кузнецов, 2005б]. Тем не менее, такая обработка была нами проведена, и ее итоги демонстрируются на рис. 7. Для расширения амплитудного спектра импульса был выбран интервал до 180 Гц, что соответствует максимальной частоте третьей гармоники исходного свип-сигнала. Результат применения оператора деконволюции (9) к сложному свип-сигналу показан на рис. 7, а, его амплитудный спектр, оценка которого получена во всем протяженном временном окне, – на рис. 7, б. Очевидно, что удалось успешно расширить спектр до заданной частоты. Это свидетельствует о перспективности нашего подхода как для применения корреляционной обработки сложного свип-сигнала, так и для его деконволюции.

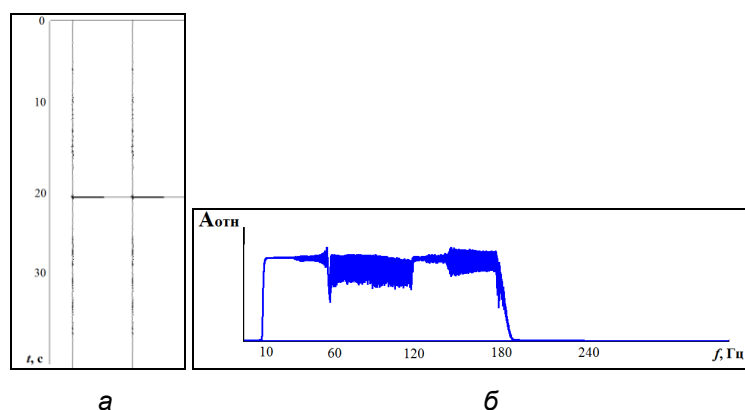


Рис. 7. Применение деконволюции для расширения спектра сигнала с учетом влияния гармоник:

а – результат свертки свип-сигнала с оператором деконволюции (9); б – амплитудный спектр полученной трассы

Амплитудный спектр результата деконволюции отчасти наследует осцилляции, которые мы наблюдали в спектре исходного импульса. Очевидно, что устранить этот эффект можно путем наращивания длины оператора обратной фильтрации.

Казалось бы, предложенный нами способ обработки сейсмических данных подразумевает доступность исходных виброграмм. Действительно, если в распоряжении имеются лишь традиционные коррелограммы, то в результате процедуры свертки трасс с неполночастотным опорным свипом спектральные компоненты, представляющие для нас интерес и находящиеся вне сигнального диапазона частот, будут безвозвратно утрачены. В то же время, предварительная корреляционная фильтрация безусловно важна для получения компактного сигнала и уменьшения объема данных. Мы вновь напомним читателю, что фокусирующие свойства оператора согласованной фильтрации почти целиком определяются его фазовым спектром. Поэтому без потери качества фокусировки сигнала в полевых условиях можно применять корреляционный фильтр, не ограниченный диапазоном частот опорного свип-сигнала, а полночастотный оператор, амплитудный спектр которого всюду равен единице. В пределах указанного диапазона его фазовый спектр должен совпадать с фазой опорного свипа, а вне пределов фазу можно назначить, например, равной нулю. В таких коррелограммах будет сохранена энергия всех частот, которые могут быть полезными при последующей широкополосной обработке, при этом объем данных будет совпадать с объемом традиционных коррелограмм. Разумеется, предложенные нами средства согласованной фильтрации с учетом гармоник потребуют более тщательного подбора фазового спектра, а также выбора соответствующего амплитудного спектра фокусирующего оператора. Оценивание искомых параметров P_1 и P_2 реализуется по амплитудному спектру трассы, тем самым оно не зависит от фазового спектра поступающих на вход данных. После построения нашего оператора в него будет введена поправка за ранее примененную в полевых условиях свертку с фазовым фильтром. Очевидно, что в силу устойчивости фазовой фильтрации такое преобразование не вызовет трудностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При возбуждении колебаний вибрационными источниками происходит искажение силового воздействия на среду, что приводит к образованию гармоник, энергия которых может быть использована для расширения спектрального состава волн. Материалы полевых работ и моделирования подтверждают образование гармоник при осложнении исходного силового воздействия. Экспериментально показано, что использование энергии гармоник позволяет выделять и проследивать отраженные волны на временах до 1,4–1,6 секунд с расширением примерно в 1,3–1,5 раза спектрального состава зарегистрированных волн, что приводит к несколько лучшей разрешенности записей на временных разрезах. Корреляция виброграмм с модифицированным управляющим сигналом, рассчитанным на выделение основных волн и гармоник, позволяет одновременно выделять волны основной и кратных частот. Наиболее обоснованным оказывается использование гармоник для расширения спектрального состава волн и прослеживания малоглубинных отражающих горизонтов.

Мы уверены в перспективности привлечения энергии гармоник в задаче повышения разрешающей способности сейсмического сигнала. Более того, игнорирование наличия кратных гармоник приводит к погрешности корреляции даже по опорному свипу. Их учет может производиться в режиме корреляции виброграммы со сложным сигналом, содержащим все значимые гармоники. В таком случае в процессе оптимальной согласованной фильтрации удастся корректно скомпенсировать фазовый спектр воздействующего на среду импульса и тем самым получить высокоразрешающий сигнал. Наши предварительные теоретические и экспериментальные исследования, результаты которых изложены в настоящей статье, представляются нам обнадеживающими.

Мы показали, что искажения расчетного свип-сигнала связаны с несимметричностью взаимодействия плиты с грунтом (это обуславливает появление четных гармоник), а также наличием эффекта пластической деформации при пиковой нагрузке (приводит к возникновению нечетных гармоник). Это позволило нам ввести удобную и компактную параметризацию сигнала реального вибровоздействия на среду, что, в свою очередь, открыло возможность получения статистических оценок неизвестных параметров. На основании таких оценок производится расчет оператора фильтрации, согласованного со сложным вибросигналом, включающим в себя гармоники всех порядков.

В первой части статьи мы показали, что если при проведении полевых работ не производятся дополнительные измерения реального вибровоздействия, то форму сигнала можно получить путем параметризации импульса с последующим статистическим оцениванием искомых параметров. Этот принцип будет привлекаться нами и во второй части статьи, где будет рассмотрен способ отдельной корреляции по гармоникам различного порядка.

В отличие от других алгоритмов, претендующих на более тщательную обработку сигнала с учетом гармоник, наш метод не требует доступности исходных виброграмм. При выборе амплитудно-частотной характеристики коррелятора, применяемого в полевых условиях, достаточно лишь не ограничивать его амплитудный спектр диапазоном частот опорного свипа, чтобы не потерять остальные спектральные компоненты. В пределах сигнального диапазона фазовый спектр этого фильтра должен совпадать с фазовым спектром опорного свипа, что обеспечит достаточную предварительную фокусировку сигнала. При последующей более тщательной обработке, в процессе которой нам предстоит оценивать неизвестные параметры сигнала, влияние ранее примененной фильтрации может быть легко учтено. К обсуждению этого вопроса, а также иных аспектов использования энергии гармоник, мы вернемся во второй части статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.** Диагностика акустических свойств неконсолидированных сред в натуральных условиях // Акустический журнал. – 2008. – Т. 54, № 4. – С. 607–620.
- Ван дер Варден Б.Л.** Математическая статистика. – М.: ИЛ, 1960. – 435 с.
- Варакин Л.Е.** Теория сложных сигналов. – М.: Советское радио, 1970. – 376 с.
- Васильев Ю.И., Иванова Л.А., Щербо М.Н.** Измерение напряжений и деформаций в грунте при распространении взрывных волн // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1969. – № 1. – С. 21–37.
- Ведерников Г.В., Максимов Л.А., Жарков А.В.** Исследование кратных гармоник вибросигналов // Геофизика. – 2001. – Спецвыпуск к 30-летию «Сибнефтегеофизики». – С. 33–38.
- Геца Н.И., Егоров Г.В., Юшин В.И.** Особенности напряженного состояния рыхлой среды, подвергаемой пульсирующей нагрузке // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Сб. тр. междунар. конф. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2004. – С. 340–347.
- Гельмгольц Г.** Учение о слуховых ощущениях как физиологическая основа для теории музыки. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 592 с.
- Гольдин С.В.** Линейные преобразования сейсмических сигналов. – М.: Недра, 1974. – 352 с.
- Гоноровский И.С.** Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
- Горькова И.М.** Структура и деформационные особенности осадочных пород. – М.: Наука, 1965. – 128 с.
- Градштейн И.С., Рыжик И.М.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1962. – 2000 с.
- Жуков А.П., Шнеерсон М.Б.** Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки. – М.: Недра, 2000. – 100 с.

- Козлов Е.А., Гогоненков Г.Н., Лернер Б.Л., Мушин И.А., Мешбей В.И., Климович Н.И., Янковский И.И.** Цифровая обработка сейсмических данных. – М.: Недра, 1973. – 309 с.
- Логинов К.И., Жуков А.П., Шнеерсон М.Б., Логинов И.В.** Нелинейные волновые поля в акустическом каротаже и вибрационной сейсморазведке. – Тверь: ГЕРС, 2012. – 88 с.
- Лурье А.И.** Нелинейная теория упругости. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
- Машинский Э.И.** Физическое обоснование неупругости пород при распространении сейсмических волн // Методы расширения частотного диапазона вибросейсмических колебаний: Сб. научных трудов. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1987. – С. 113–125.
- Оппенгейм А.В., Шафер Р.В.** Цифровая обработка сигналов. – М.: Связь, 1979. – 416 с.
- Отнес Р., Эноксон Л.** Прикладной анализ временных рядов. – М.: Мир, 1982. – 428 с.
- Подъяпольский Г.С.** Физика упругих волн // Справочник геофизика. – М.: Недра, 1966. – Т. IV. – С. 28–96.
- Привалов И.И.** Ряды Фурье. – М.: Либроком, 2011. – 168 с.
- Работнов Ю.Н.** Сопrotивление материалов. – М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.
- Рапопорт М.Б.** Автоматическая обработка записей колебаний в сейсморазведке. – М.: Недра, 1973. – 184 с.
- Справочник геофизика.** Сейсморазведка / под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. – М.: Недра, 1981. – 464 с.
- Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки** / под ред. М.Б. Шнеерсона. – М.: Недра, 1998. – 527 с.
- Финк Л.М.** Сигналы, помехи, ошибки... – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
- Циммерман В.В.** Нелинейные свойства электрогидравлического вибрационного источника сейсмических сигналов // Проблемы нелинейной сейсмологии: Сб. работ ИФЗ АН СССР. – М.: Наука, 1987. – С. 273–279.
- Циммерман В.В.** Качество вибрационного излучения // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2004. – № 3. – С. 19–21.
- Шехтман Г.А., Кузнецов В.М.** Деконволюция виброграмм ВСП – альтернатива корреляционной обработке или ее подспорье? // Технологии сейсморазведки. – 2005а. – № 2. – С. 80–85.
- Шехтман Г.А., Кузнецов В.М.** Корреляция или деконволюция виброграмм – что лучше? // ВСП и трехмерные системы наблюдений в сейсморазведке: Гальперинские чтения. – М.: Geovers, 2005б. – С. 44–47.
- Berkhout A.J.** Related properties of minimum-phase and zero-phase time functions // Geophysical Prospecting. – 1974. – Vol. 22, No. 4. – P. 683–709.
- Harrison C.B., Margrave G.F., Lamoureux M., Siewert A., Barrett A., Isaac H.** From noise to signal – Harnessing harmonics for imaging // 83rd SEG Annual Meeting: Expanded Abstracts. – 2013. – P. 131–135.
- Pecholcs P.I., Al-Saad R., Heijna H.B., Haldorsen J.B.U., Coates R.T., Barajas-Olalde C., Ahmed S.** A simultaneous uncorrelated VSP and surface seismic field test study // 78th SEG Annual Meeting: Expanded Abstracts. – 2013. – P. 478–482.
- Wei Z.** A new generation low frequency seismic vibrator // 85th SEG Annual Meeting: Expanded Abstracts. – 2015. – P. 211–215.
- Zhukov A., Korotkov I., Nekrasov I., Galikeev T., Sidenko E.** Real-time adaptive broadband seismic acquisition // 78th EAGE Conference and Exhibition: Expanded Abstracts. – 2016.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДЕНИСОВ Михаил Сергеевич – доктор физико-математических наук, директор по науке ООО «ГЕОЛАБ». Область научных интересов: разработка алгоритмов обработки сейсмических записей.

ШНЕЕРСОН Михаил Борисович – доктор технических наук, профессор РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. Область научных интересов: невзрывная сейсморазведка.