

Приповерхностные механические резонансы в разведочной геофизике

■ Шехтман Г.А., ООО «НПП «Спецгеофизика»», г. Москва

Введение

Контакт с исследуемой средой неизбежно порождает проблемы, вызванные резонансными механическими колебаниями, параметры которых зависят от массы датчиков, присоединенной массы среды и от ее упругих свойств.

Возникающие на контакте сейсмоприемника с грунтом резонансные колебания накладываются на гораздо более слабые полезные сигналы, в результате чего существенно снижается качество их выделения, влияющее на результаты сейсморазведки в целом. В дополнение к таким резонансным колебаниям могут иметь место резонансные колебания объектов, расположенных непосредственно в приповерхностной зоне геологического разреза. Эти колебания могут быть вызваны неоднородностями, отличающимися по упругим свойствам от вмещающей среды (Korneev, 2009). Кроме того, резонансные колебания могут быть зарегистрированы при проведении наблюдений на льду не промерзших до дна водоемов или на заболоченных участках местности. Являющиеся бесспорно полезными при решении задач инженерной и малоглубинной сейсморазведки, в нефтяной сейсморазведке такие резонансные колебания расцениваются как помехи, так как они могут накладываться на более слабые сигналы, отраженные от целевых объектов.

Покрытые льдом водные просторы в зимнее время являются удобным объектом исследований для сейсмической разведки и гравиметрической разведки. В условиях лесной местности работа на водоемах приводит к резкому удешевле-

нию работ, причем в зимнее время для этого не требуется использования никакого водного транспорта. Однако ледовая толща, которую можно уподобить гигантской мембране, создает колебания, собственные частоты которых вполне попадают в рабочий диапазон частот современной широкополосной сейсморазведки, а также препятствуют высокоточным гравиметрическим наблюдениям.

Уход от искажающего влияния верхней части разреза путем погружения сейсмоприемников непосредственно в исследуемую среду помогает избежать контактных резонансов в рабочем диапазоне частот. Но в предельном случае – при наблюдениях внутри среды методом вертикального сейсмического профилирования (ВСП) – возникают свои проблемы, обусловленные необходимостью обеспечить надежный контакт скважинного сейсмоприемника со стенкой скважины, а обсадной колонны – с окружающей средой. Эти проблемы требуют отдельного рассмотрения.

1. Резонансы в наземной сейсморазведке

Упругие свойства горных пород в приповерхностной зоне проявляют себя в возникновении механических резонансов в точках установки сейсмоприемника. Эти резонансы, попадая в рабочий диапазон частот, существенно снижают разрешенность сейсмических записей.

Изучением контактных резонансов в сейсморазведке занимались многие ученые. В 1950-х годах теоретическими и экспериментальными исследованиями резонансных явлений в колебательной

системе почва-сейсмоприемник занимались Больших С.Ф., Гамбурцев Г.А., Пасечник И.П. и др. Актуальность постановки новых исследований в этом направлении была обусловлена, главным образом, расширением типов используемых в сейсморазведке волн. Привлечение, наряду с продольными волнами, поперечных и обменных волн позволило приступить к созданию многоволновой сейсморазведки. Для корректной обработки данных трехкомпонентной широкополосной сейсморазведки потребовалось всестороннее изучение характера резонансов приемной системы, содержащей, наряду с вертикальным, горизонтальные сейсмоприемники.

В математических моделях системы сейсмоприемник-почва все больше стали учитывать присутствие в конструкции корпуса сейсмоприемника такого элемента, как концентратор – заостренного стержня конусообразной формы, при помощи которого корпус прикреплялся к почве путем внедрения в нее концентратора. Вертикальные сейсмоприемники содержали один такой концентратор, а трехкомпонентные – два или три. Наличие более одного концентратора позволяло устранять паразитные резонансные колебания, вызванные раскачиванием корпуса, к которому весьма чувствительны горизонтальные сейсмоприемники.

Модель контакта сейсмоприемник-почва была сильно упрощенной [Зайцев, 1985]. Однако полученные при ее помощи теоретические результаты неплохо стыковались с экспериментальными и были весьма полезны для понимания сути резонансных явлений. Было установлено, что при внедрении в почву одного концентратора при разной глубине его погружения возможны сильные искажения динамики волнового поля.

Если же корпус сейсмоприемника содержит два концентратора, то такая система менее чувствительна к вариациям высоты центра тяжести сейсмоприемника.

В случае горизонтального сейсмоприемника резонансная частота связанной системы сейсмоприемник-почва определяется нижней из двух собственных частот системы и обусловлена вращением горизонтального сейсмоприемника вокруг нестационарной оси, расположенной ниже центра тяжести сейсмоприемника.

Погружение корпуса сейсмоприемника в приповерхностную зону давно было признано в качестве радикального средства улучшения качества контакта со средой и избавления от нежелательных резонансов в рабочей полосе частот [Krohn, 1984].

При сопоставлении теории с практикой для горизонтальных сейсмоприемников было отмечено расхождение. Оно проявлялось в том, что в реальных средах, вопреки теории, при увеличении длины концентратора собственная частота системы остается неизменной или снижается [Krohn, 1984]. Этот парадокс объяснил В.П.Зайцев [Зайцев, 1985]: увеличение длины концентратора приводит к тому, что по глубине внедрения длинного конца концентратора будет существовать значительный перепад жесткостей почвы, обусловленный наличием вегетативного надпочвенного слоя, комковатостью, перепадом влажности. Вследствие этого при воздействии горизонтальной силы на такую систему оказывается, что конец длинного концентратора зажат сильнее, чем его прикрепленная к корпусу вершина. Это равносильно увеличению высоты центра тяжести системы из-за слабо зажатой верхней части концентратора и к уменьшению радиуса эквивалентной площад-

ки контакта. Тем самым создаются условия для снижения частоты контактного резонанса.

В последующие годы были разработаны автономные модули бескабельных систем, которые контактировали с почвой посредством концентраторов или путем вдавливания их в приповерхностную среду [Череповский, Овчинников, 2019]. Проблемы с контактными резонансами у модулей, содержащих концентраторы, явно усугубились, поскольку центр тяжести корпуса, содержащего приемник и электронику, находился выше, чем у легких одиночных сейсмоприемников кабельных систем и «минимально-кабельных» систем. С точки зрения качества записей, заглубляемые автоматизированные бескабельные системы безусловно более предпочтительны, если не касаться сложностей с обеспечением их надежного контакта со средой, имеющей жесткую поверхность или, напротив, чересчур рыхлую (снег, песок).

Концентраторы далеко не всегда стали применяться в практике сейсморазведочных работ. Работы с ними оказались более дорогостоящими, чем работы с буксируемыми косами, применяемыми на заснеженных территориях, в покрытых песком пустынях, на дорогах и других участках с твердым покрытием [Eiken et al., 1989; van der Veen et al., 2001]. Поэтому продолжали исследовать разные математические модели контакта со средой без концентраторов [Carcione et al., 2016]. Существенно, что качество получаемых при этом полевых сейсмических записей не уступало существенно качеству записей с концентраторами, а также с сейсмоприемниками, погружен-

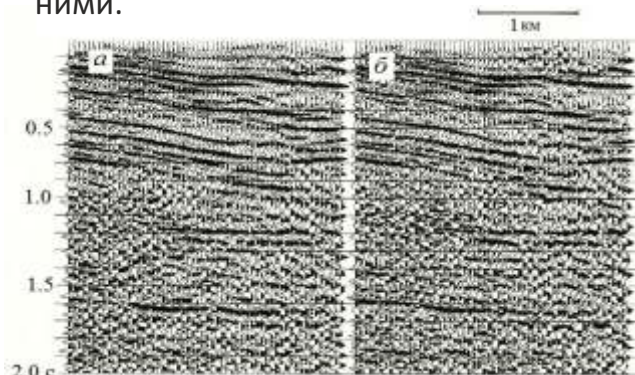
ными на некоторую глубину. Приведем примеры из упомянутых выше работ.

На рис. 1 сравниваются разрезы ОГТ, полученные при помощи буксируемой косы (стримера) и при погружении сейсмоприемников на 10-20 см вручную в слой снега, покрывающий породы вечной мерзлоты. Автоматическая ориентация сейсмоприемников в стримере достигалась посредством крепления датчиков в маслonaполненных металлических корпусах при помощи карданов. Оба разреза получены при спокойной погоде от взрывов детонирующего шнура с 15-кратным перекрытием. Можно видеть, что на обоих разрезах целевые горизонты, расположенные в пределах 0.5-1.0 с, практически не различаются между собой. Мало различаются между собой и исходные записи, полученные стримером на поверхности полуметровой толщи снега и на ее подошве, расположенной на породах вечной мерзлоты (Рис. 2). В качестве одного из существенных недостатков работы со стримером отмечена высокая чувствительность сейсмоприемников к ветровым помехам при большой скорости ветра.

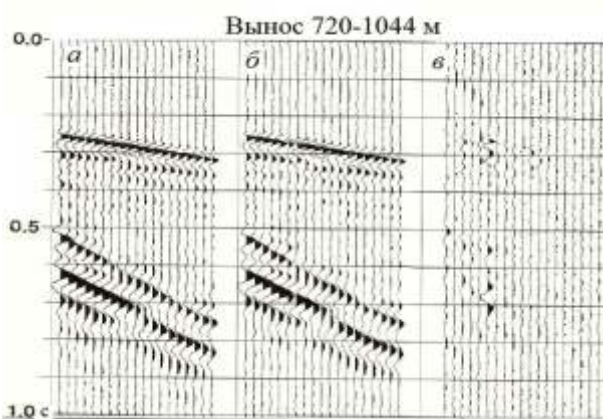
На Рис. 3 – Рис. 5 приведены амплитудные спектры записей, полученных при изучении верхней части разреза на лугу, на асфальте и дороге, покрытой гравием [van der Veen et al., 2001]. Использовали сейсмоприемники с концентраторами, утяжеленные сейсмоприемники на подставке (при работах на асфальте) и прикрепленные к стримеру самоориентирующиеся сейсмоприемники, в которых преобразователь в корпусе закреплен в кардановом подвесе. При работах

на асфальте концентраторы погружали в почву рядом с асфальтом.

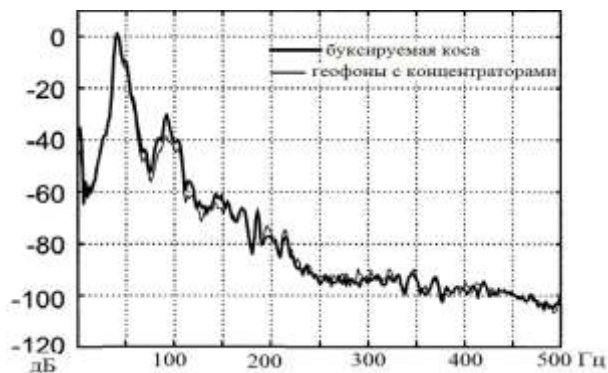
Наилучшее совпадение спектров записей, полученных при регистрации колебаний стримером и сейсмоприемниками с концентраторами, наблюдается при работах на лугу (Рис. 3). В остальных случаях наблюдаются различия в амплитудах компонент спектра, достигающие 15 дБ (Рис.4 и Рис.5). Сопоставление между собой разрезов ОГТ для разных типов сейсмоприемников не обнаруживает существенных различий между ними.



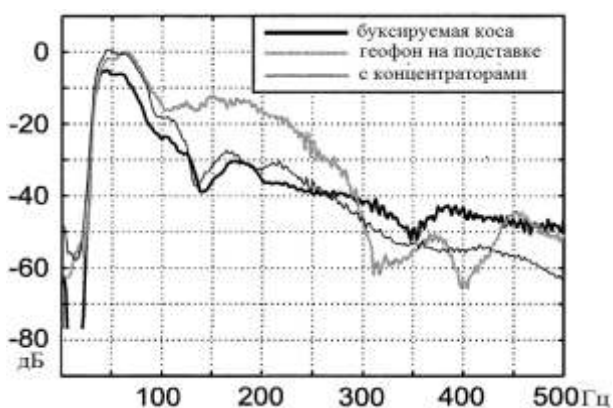
▲ Рис. 1. Сравнение разрезов ОГТ, полученных при помощи стримера (а) и при помощи сейсмоприемников, погруженных в среду (б). Модифицированный рисунок из [Eiken et al., 1989].



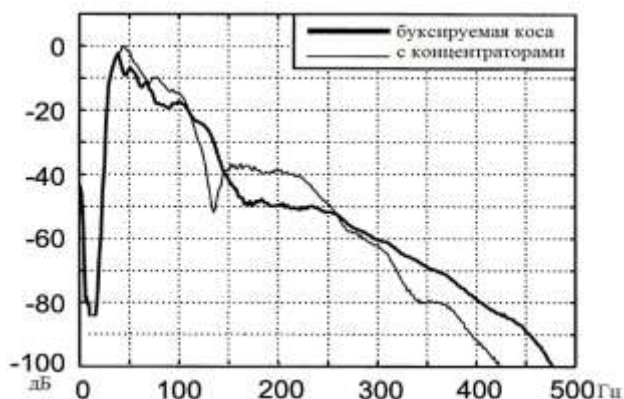
▲ Рис. 2. Сравнение записей, полученных на поверхности полуметровой толщи снега (а) и на поверхности вечной мерзлоты под снегом (б). Справа (в) приведена разность обеих записей. Модифицированный рисунок из [Eiken et al., 1989].



▲ Рис. 3. Амплитудные спектры записей, полученных на лугу стримером (толстая линия) и геофонами с концентраторами (тонкая линия). Модифицированный рисунок из [van der Veen et al., 2001].



▲ Рис. 4. Амплитудные спектры записей, полученных на асфальте и вблизи него (с концентраторами), для буксируемой косы (толстая линия), для геофонов с концентраторами (тонкая линия) и для геофонов на подставке (толстая серая линия). Модифицированный рисунок из [van der Veen et al., 2001].



▲ Рис. 5. Амплитудные спектры записей, полученных на дороге с плотным гравием, для буксируемой косы (толстая линия) и для геофонов с концентраторами (тонкая линия). Модифицированный рисунок из [van der Veen et al., 2001].

2. Резонансы в скважинной сейсмо-разведке

Непременным условием получения качественных записей внутри среды является надежный контакт скважинных приборов со стенкой скважины. Именно с обеспечения такого контакта начался переход от сейсмокаротажа на продольных волнах, при котором определяли лишь время прихода прямой продольной волны, к ВСП, при котором объектом изучения является всё волновое поле, формирующееся внутри среды. Скважинные сейсмические приборы, снабженные различными прижимными устройствами, начали конструировать гораздо раньше появления метода ВСП. И как только их стали применять, появилась возможность регистрировать внутри среды неискаженные импульсы прямой волны и отраженных волн. Разработка трехкомпонентных скважинных приборов с прижимными устройствами позволила регистрировать в скважине поперечные волны [Жадин, 1960].

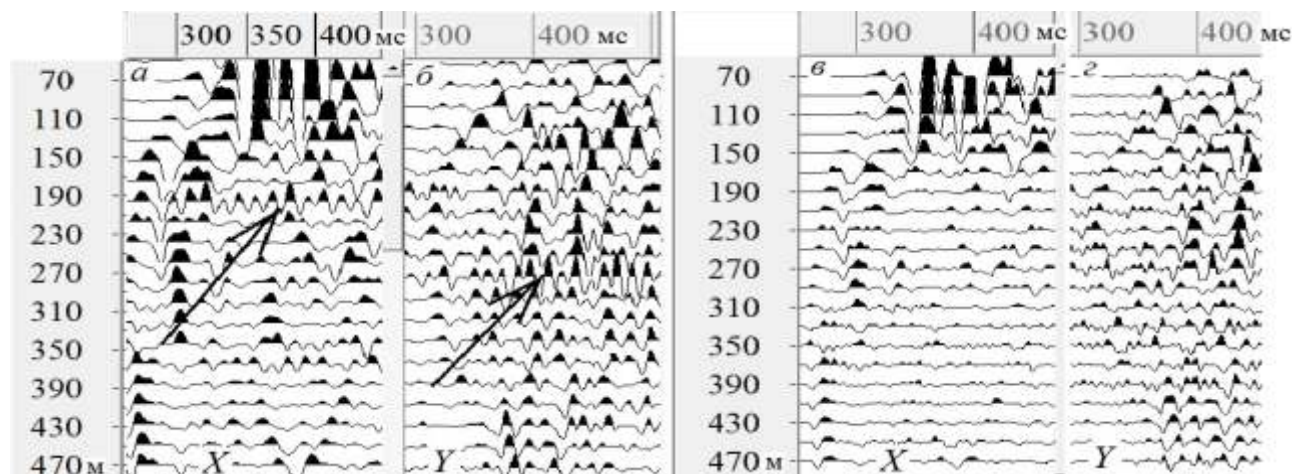
Наилучшие условия для приема упругих колебаний обеспечиваются при жестком контакте сейсмоприемника со стенкой скважины, так как при этом частота собственных колебаний на контакте находится далеко за пределами регистрируемого диапазона, в области высоких частот [Шехтман, Каплунов, 1974; Hardage, 2000].

Обеспечение силы прижима, на порядок превышающей вес снаряда, достигаемое путем использования достаточно жестких управляемых прижимных устройств, позволяет в современной скважинной аппаратуре добиться практически неискаженного приема упругих колебаний, направление смещения которых близко к направлению оси скважинного прибора. Однако в случае значительных углов подхода волн к скважинному прибору, а также при регистрации обменных и поперечных волн условия их неискаженного приема

существенно ужесточаются. Даже когда прижимное усилие на контакте прибора со стенкой скважины достаточно велико для предотвращения паразитных продольных колебаний снаряда, а также для ослабления натяжения кабеля, на котором висит зонд, остается опасность возникновения вращательных колебаний прибора, обусловленных наличием у него, кроме продольных перемещений, еще одной степени свободы.

Искажения сигналов, регистрируемых горизонтальными сейсмоприемниками зонда, происходят из-за возникновения вращательных колебаний относительно линии касания корпуса прибора со стенкой скважины.

Работы в направлении усовершенствования конструкции скважинных приборов в части улучшения контакта со стенками скважины продолжаются. Одним из направлений таких исследований является устранение противоречий между миниатюризацией скважинных приборов и ухудшающимися при этом условиями их контакта со средой. Качество этого контакта зависит непосредственно от площади контакта: при малом диаметре скважинного прибора площадь его контакта со стенкой скважины невелика. Это приводит к тому, что резонансная частота паразитных колебаний на контакте прибор-стенка скважины, величина которой пропорциональна квадратному корню площади этого контакта, может попасть в рабочий диапазон сейсмических частот [Beydoun, 1984]. Ситуация при этом является противоречивой, т.к. диаметр прибора и его массу стремятся сделать минимальными именно для того, чтобы собственная частота колебаний прибора находилась вне рабочей полосы частот. В одном из технических решений это противоречие устраняется путем жесткого крепления к скважинным приборам башмаков, наружный диаметр которых близок к внутреннему диаметру скважины [Шехтман и др., 2010].



▲ Рис. 6. Сравнение сейсмограмм ВСП, полученных на разных горизонтальных компонентах без упоров (а и б) и с упорами (в и г). Стрелками показаны трассы, осложненные резонансными колебаниями.

Гораздо более простым и не менее надежным является жесткое крепление к скважинным приборам тонких, но достаточно жестких, пластин с возможностью их изгибания под действием прижимного усилия [Шехтман, Касимов, 2012]. Такие пластины, ширина которых близка к диаметру скважины, вполне компенсируют ухудшение контакта скважинных приборов со стенками скважины при миниатюризации аппаратуры. Рассмотрим примеры улучшения качества записей ВСП при помощи таких пластин (производители называли их упорами).

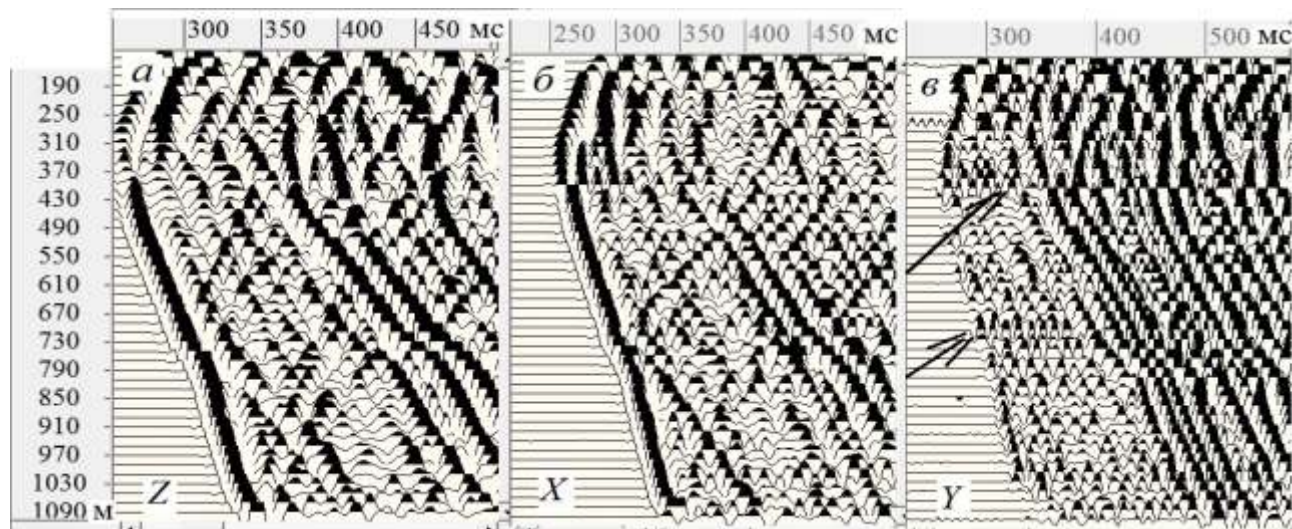
На Рис. 6 сравниваются записи на X- и Y-компонентах, полученные с гладкими

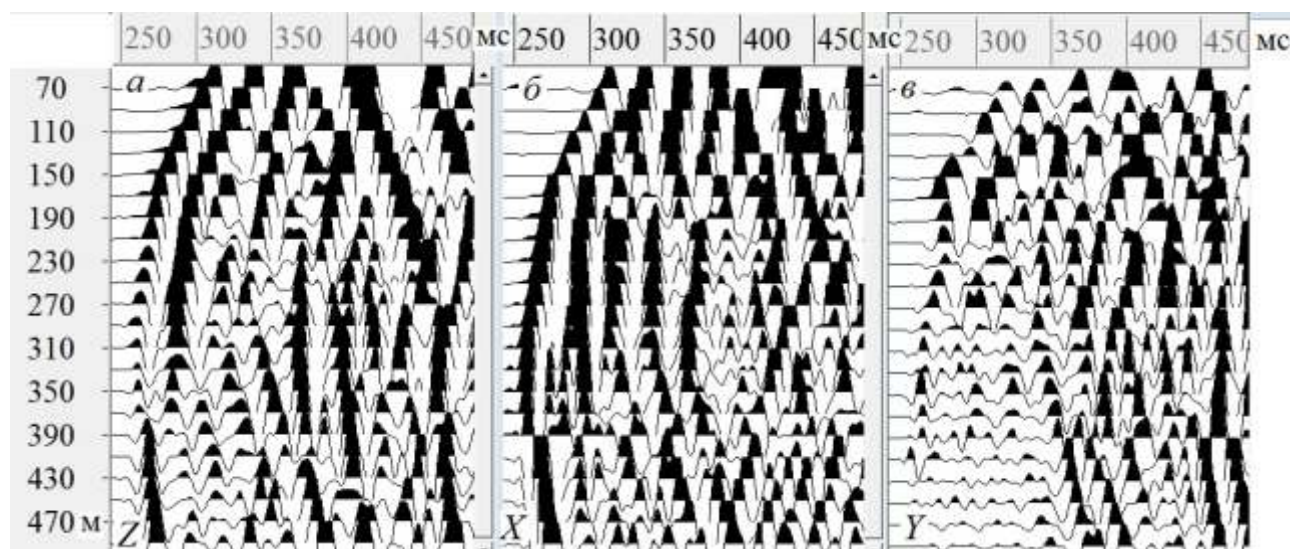
корпусами приборов зонда ВСП (Рис. 6, а и б) и с прикрепленными к корпусам дополнительными упорами (Рис. 6, в и г). Видно, что указанные стрелками квазисинусоидальные резонансные помехи пропадают, если используют упоры.

На Рис. 7 приведены записи, полученные на разных компонентах без упоров. На записях Y-компоненты отчетливо видны резонансные помехи (указаны стрелками). Верхняя часть этой же скважины, отработанная до глубины 470 м с упорами, не содержит на записях таких помех (Рис. 8).

Более подробно вопрос о влиянии качества контактов скважинного прибора со стенкой скважины на записи ВСП изложен в моей книге [Шехтман, 2017].

▼ Рис. 7. Сейсмограммы ВСП, полученные без упоров на разных компонентах. Стрелками на компоненте Y показаны трассы, осложненные резонансными колебаниями (в).





▲ Рис. 8. Сейсмограммы ВСП, полученные с упорами на разных компонентах. На компоненте Y отсутствуют трассы, осложненные резонансными колебаниями (в).

Подавляющая часть объемов работ ВСП проводится в обсаженных скважинах. Качество контакта скважинного прибора со стенкой обсаженной скважины перестает иметь значение в том случае, если сама обсадка плохо контактирует со стенкой пробуренной скважины. Это имеет место в том случае, когда в затрубном пространстве обсадной колонны отсутствует цемент либо он плохого качества. С возникающими при этом вибрационными трубными волнами справиться на этапе обработки бывает невозможно. И тогда в качестве практически единственного способа получения материала приемлемого качества является крепление дополнительных прижимных устройств непосредственно к обсадной колонне перед ее спуском в скважину [Шехтман и др., 2019].

3. Резонансы в гравиметрической разведке

Покрывающая водоемы толща льда, в отличие от твердой суши, в широком диапазоне частот создает помехи для наблюдений, снижающие точность работ. Чувствительный элемент гравиметров по существу представляет собой сейсмоприемник, поэтому гравиметры

чутко реагируют как на изменения силы тяжести, так и на помехи в виде инерциальных ускорений. Собственная частота чувствительной системы гравиметра Scintrex CG-3 составляет 6 Гц, гравиметра ГНУ-КВ – 0.2 Гц, гравиметра LaCoste & Romberg G/D – 0.1 Гц. Частота собственных колебаний гравиметров позволяет им регистрировать колебания льда водоемов, представляющего собой колеблющуюся мембрану.

Проблема подавления помех при проведении гравиметрической съемки на льду имеет много общего с аналогичной проблемой в морской гравиметрии, в которой в качестве достаточно эффективного способа были предложены аппаратные технические решения. Принципиальным прорывом в этом направлении стало предложение К.Е.Веселова об использовании в 1950-х годах в качестве морского инструмента гравиметра с закритически демпфированным датчиком. Это был первый в мире морской статический гравиметр. Наиболее значимые результаты в этом направлении получены в последующих работах российских геофизиков (Пантелеев, 1983).

Известен способ проведения высокоточной гравиметрической съемки на опорной и рядовой сети, в котором высокая точность достигается путем применения высокоточных гравиметров, многократностью повторных наблюдений и сокращением продолжительности рейсов путем использования быстроходных видов транспорта (Костицын, 2012). Недостаток этого способа состоит в том, что высокая точность наблюдений, вполне достижимая на твердых грунтах, не может быть достигнута при наблюдениях на замерзших водоемах из-за высокочастотных и низкочастотных колебаний поверхности льда, создающих сильный фон помех. Рутинная высокоточная гравиразведка практически перестает быть таковой из-за низкой точности наблюдений на поверхности льда. Многократные наблюдения, несмотря на высокую квалификацию операторов, не обеспечивают требуемой точности, характерной для детальной высокоточной гравиразведки.

Переход от многократных наблюдений к наблюдениям непрерывным, сопровождаемым синхронным непрерывным измерением координат и высоты точки наблюдения, позволяет повысить точность наблюдений на порядок [Веселов и др., 2018]. При этом синхронно с гравиметрическими наблюдениями проводят в дифференциальном режиме высокоточные непрерывные наблюдения спутниковой навигационной системой при расположении базовой станции на твердом грунте, и на основе спутниковой навигации вводят динамические поправки в аномалии силы тяжести. Тем самым гравиразведка становится высокоточной как на твердом грунте, так и на примыкающем к нему водоему, покрытом льдом. От ранее известных подходов к проведению высокоточной гравиметрической съемки данная методика существенно отличается тем, что при переходе от наблюдений на твердом грунте к наблюдениям на льду замерзших водоемов не происходит скачкообразного падения точности наблюдений.

метрической съемки данная методика существенно отличается тем, что при переходе от наблюдений на твердом грунте к наблюдениям на льду замерзших водоемов не происходит скачкообразного падения точности наблюдений.

Заключение

Совершенствование геофизической аппаратуры сопровождается обеспечением условий для получения качественных данных. Для этого исследуют источники возможных помех и математические модели резонансов, возникающих в приповерхностной зоне и на контакте датчиков со средой. Погружение датчиков в среду неизбежно удорожает работы, а ненадежный контакт датчиков со средой чреват снижением качества данных и неполучением достаточной полезной информации об исследуемых объектах. Поэтому поиск оптимальных условий получения геофизических данных еще долго будет оставаться важнейшей задачей, актуальной для геофизиков при работах на различных территориях и участках.

Отдельного рассмотрения заслуживают резонансные колебания, возникающие на контакте источников сейсмических колебаний со средой, а также способы подавления таких колебаний. В этом направлении уже достигнуты определенные успехи, и наиболее успешное развитие они получили в вибрационной сейсмической разведке [Колесов и др., 2016].

Литература

Веселов А.К., Каширских М.Ф., Смирнова И.А. Способ гравиметрической съемки // Патент РФ № 2679643, заявл. 16.04.2018, опубл. 12.02.2019, Бюл. № 5.

Воронин Ю.А., Жадин В.В. О частотных искажениях сейсмического сигнала при

регистрации трехкомпонентным скважинным сейсмоприемником // Геология и геофизика. 1964. № 3. С. 154-156.

Жадин В.В. Трехкомпонентные измерения амплитуд и скоростей распространения продольных и поперечных волн в глубокой скважине // Геология и геофизика. 1960. № 10. С. 129-136.

Зайцев В.П. Резонансные частоты в системе горизонтальный сейсмоприемник – почва//Новосибирск, 1985, 44 с. (Препринт № 3. Институт геологии и геофизики СО АН СССР).

Колесов С.В., Жуков А.П., Шехтман Г.А. Способ вибрационной сейсморазведки//Патент РФ № 2593782, опублик. 10.08.2016.

Костицын В.И. Методы повышения точности и геологической эффективности детальной гравиразведки//Пермь, 2002. – 224 с.

Пантелеев В.Л. Основы морской гравиметрии//М.: Недра, 1983. – 256 с.

Череповский А.В., Овчинников В.А. Повышение качества сейсмических данных и снижение рисков травматизма путем автоматизации и роботизации полевых работ//Приборы и системы разведочной геофизики, № 2, 2019. С. 26-31.

Шехтман Г.А. Вертикальное сейсмическое профилирование. – М.: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2017. – 284 с.

Шехтман Г.А., Каплунов А.И. О влиянии силы прижима скважинных приборов на характер регистрируемых сигналов при вертикальном сейсмическом профилировании (ВСП) // Прикладная геофизика, 1974, вып. 73. С. 95-101.

Шехтман Г.А., Касимов А.Н., Редкоп В.А. Скважинный сейсмический прибор// Патент РФ № 2444030 от 21.12.2010.

Шехтман Г.А., Касимов А.Н.О. Скважинный сейсмический прибор//Патент РФ от 16.08.2012, опубликовано 10.01.2014. Бюл. № 1.

Шехтман Г.А., Жуков А.П., Сираев И.А., Владов М.Л. Способ вертикального сейсмического профилирования//Патент РФ от

01.11.2019, опубликовано 17.08.2020, Бюл. № 23.

Beydoun W.B., 1984, Seismic tool-formation coupling in boreholes, in Toksöz, M.N., and Stewart, R.R., Eds., Vertical seismic profiling, Part B: Advanced concepts: Geophysical Press, 177-188.

Carcione J.M., Almalki H.S., Qadrouh A.N. Geophone-ground coupling with flat bases//Geophysical Prospecting, 2016, 64, 255–267

Eiken, O., Degutsch, M., Riste, P. and Rod, K. 1989. Snowstreamer: an efficient tool in seismic acquisition// First Break 9, 374-378.

Hardage B.A. Vertical seismic profiling: principles. Third updated and revised edition// PERGAMON, 2000, P. 552.

Krohn C.E. Geophone – ground coupling//Geophysics, 1984, v.49, # 6, p. 722-731.

Korneev Valeri Resonant seismic emission of subsurface objects//Geophysics, vol. 74, 2, 2009, P. T47-T53.

Van der Veen, M., Spitzer, R., Green, A.G. and Wild, P. 2001. Design and application of a towed land-streamer system for cost-effective 2-D and pseudo-3-D shallow seismic data acquisition// Geophysics 66, 482–500.

Подробнее об авторах



Шехтман
Григорий Аронович

Д. т. н.,
ООО «НПП
«Спецгеофизика»»,
г. Москва