

Основные причины ухудшения динамики возбуждаемых вибросейсмических колебаний в условиях Крайнего Севера

■ Кострыгин Ю.П., ООО «Новоросморгео», г. Новороссийск

Специфические особенности волнового поля, регистрируемого при вибросейсмических наблюдениях в условиях Крайнего Севера в зимний период, в значительной степени связаны с существованием на дневной поверхности мощного снежного покрова, а также с большим количеством озёр, рек, ручьёв, покрытых слоем льда толщиной 60 – 110 сантиметров. В тундровой зоне на характер возбуждаемых волновых полей дополнительно может влиять фактор повышенной шероховатости дневной поверхности.

Одной из первых организаций, исследовавших в начале восьмидесятых годов влияние слоя лёд-вода на качество вибросейсмических записей, было объединение «Союзморгео». В это время значительно возросли объёмы сейсморазведочных работ в пределах арктических морей. Вместе с тем большая часть акваторий таких морей, как Карское море, море Лаптевых, Восточно – Сибирское море и Чукотское море, практически круглый год была покрыта льдами, что делало невозможным проведение сейсморазведочных работ с использованием геофизических судов. И в связи с этим руководство объединения «Союзморгео» приняло решение отработать несколько профилей по технологии ОГТ с применением вибросейсмического метода на льдах Баренцева моря и оценить эффективность таких наблюдений. На основании проведённых исследований было показано, что система лёд-вода

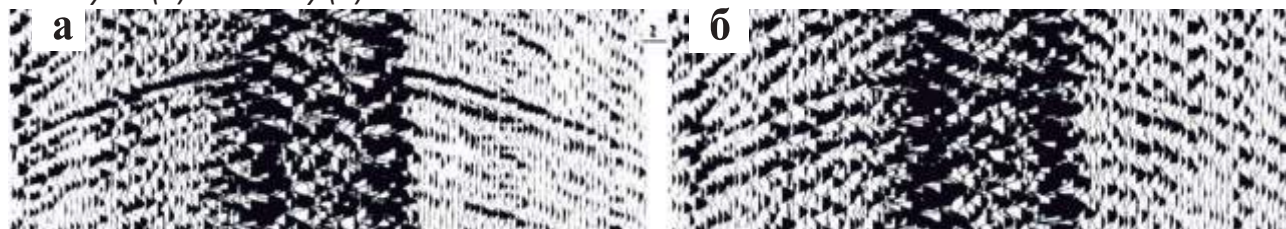
имеет весьма низкочастотный собственный колебательный процесс. Поэтому вибросейсмические записи, полученные на льдах морской акватории, характеризовались по сравнению с сейсмограммами, зарегистрированными на суше, существенно более низкочастотным составом колебаний, худшей разрешённостью и значительно меньшей информативностью. Таким образом было очевидно, что использовать вибросейсмический метод в пределах ледяных полей арктических морей не целесообразно [1].

Аналогичные выводы о влиянии слоя лёд-вода на качество вибросейсмических записей были сделаны и в условиях Западной Сибири [3].

Так, на рисунке 1 сопоставлены отражения, зарегистрированные на Южно-Ярэйской площади от горизонтов Баженовской нефтеносной свиты при установке вибраторов на суше (а) и на льду (б) при неполном промерзании водоёма. Толщина льда на участке исследования равнялась 70 см, толщина слоя воды – 15 см. Расстояние между пунктами возбуждения не превышало 50 м. Из рисунка можно видеть, что при установке вибраторов на суше целевые отражения динамически значительно более выражены. При установке же излучателей на льду динамика отражений существенно ухудшается.

В связи с этим возникает вполне естественный вопрос: «Будут ли происходить искажения динамики колебаний при

▼ Рис. 1. Баженовская группа отражений, зарегистрированная при установке вибраторов на суше (а) и на льду (б).

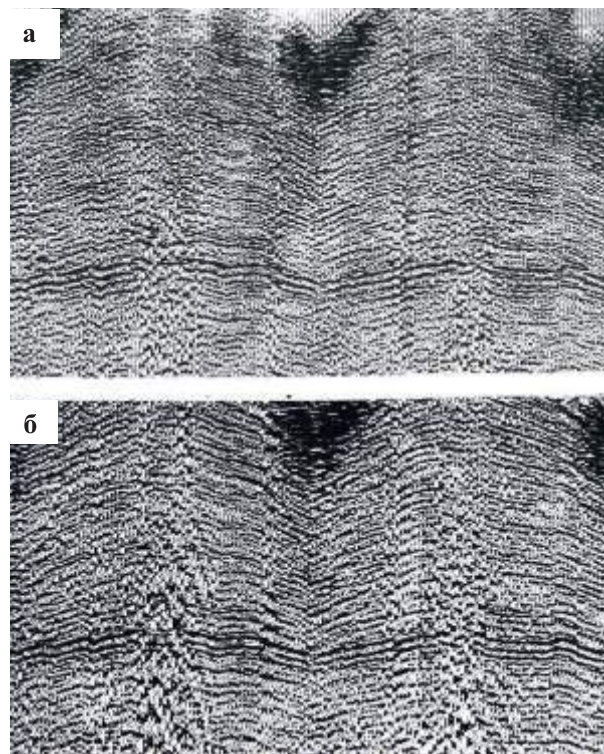


переходе с суши на лёд в случае использования буровзрывного источника?». Из рисунка 2 следует вывод о том, что смещение взрывного скважинного излучателя с суши на лёд практически не приводит к ухудшению динамики регистрируемых колебаний. В данном случае масса тротила составляла 0,5 кг, а глубина заложения заряда равнялась 8 м.

Таким образом, если при установке вибраторов на льду водоёмов, которые не промёрзли до дна, наблюдается весьма заметное ухудшение динамики возбуждаемых колебаний, то для буровзрывных излучателей с переходом с суши на лёд качество материалов практически не снижается. Такое обстоятельство, безусловно, необходимо учитывать при реализации наиболее значимых сейсмических проектов путём организации двух - отрядных партий. Вибросейсмический отряд целесообразно использовать исключительно на сухопутных участках исследуемой площади, а буро – взрывной отряд в пределах водоёмов. Именно так были организованы фактически первые в Российской Федерации работы 3D на Сугмутской площади, что обеспечило в основном равноценное качество сейсмических материалов в пределах всей территории исследования.

Интересно также отметить, что при полном промерзании водоёмов перемещение вибраторов с суши на лёд не только не приводило к ухудшению сейсмических материалов, но и позволяло несколько улучшить динамику регистрируемых колебаний. Так, на рис. 3 сопоставлены коррелограммы, полученные при установке вибраторов на льду. В одном случае (рис. 3, а) под слоем льда, толщиной 70 см, оставался незамерзающий слой воды, толщиной 10 см, а в другом - озеро промёрзло до дна (рис. 3, б). Расстояние между пунктами возбуждения равнялось 50 м.

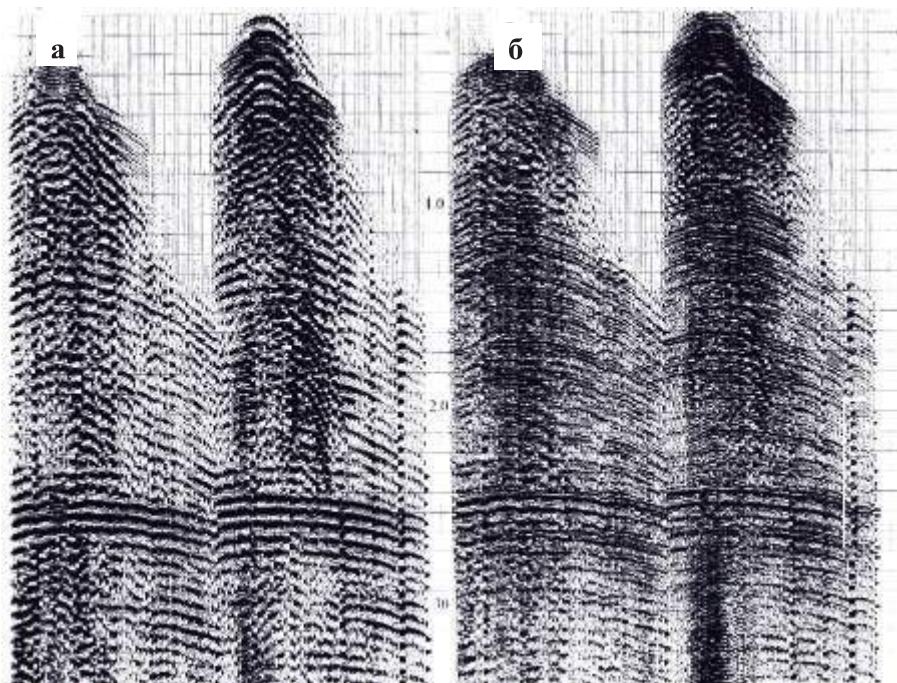
Из рис. 3 видно, что вибросейсмические записи, регистрируемые при полном



▲ Рис. 2. Сейсмограммы, зарегистрированные с использованием взрывного скважинного источника ($h_{взр} = 8$ м). а - взрыв в условиях суши; б - взрыв в пределах водоёма.

промерзании водоёма, характеризуются значительно более высокочастотным составом колебаний, более низким уровнем доминирующих поверхностных волн и несоизмеримо большей информативностью по сравнению с записями, зарегистрированными при двухслойной модели водоёма.

В отдельные годы участки с полным промерзанием озёр в условиях Крайнего Севера занимают весьма значительные площади, что целесообразно учитывать при проектировании систем наблюдения. В этой связи практический интерес представляет методика полевых наблюдений 3D, которую в 2001 году использовала ООО «Новосибнефтегазгеофизика» в пределах Губкинского нефтегазоносного района, позволившая существенно повысить геологическую эффективность сейсмических исследований. Для реализации конкретной методики обществом был приобретён и установлен на гусеничном вездеходе радиоледомер, с использованием которого достаточно оператив-



◀ Рис. 3. Коррелограммы, полученные при установке вибраторов на льду.
а – под слоем льда, толщиной $h_{\text{льда}} = 70$ см, оставался слой воды, толщиной 10 см;
б – озеро промёрзло до дна ($h_{\text{льда}} = 80$ см).

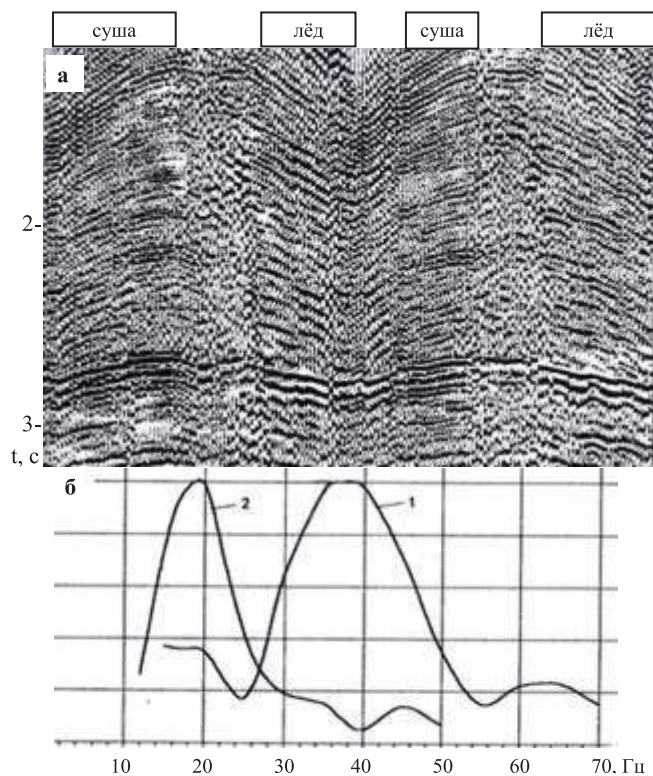
но определялась геометрия участков, на которых водоёмы промёрзли до дна. А далее с использованием способа, предложенного в работе [5], проектировались и отрабатывались системы наблюдений 3D, при которых большая часть пунктов возбуждения располагалась на участках с полным промерзанием водоёмов.

Вибросейсмические работы, проведённые в условиях Крайнего Севера, свидетельствуют также о том, что не столь значительное, как при установке вибраторов на льду, но тем не менее достаточно заметное ухудшение качества сейсмических записей, происходит и в результате смещения с суши на лёд расстановки сейсмоприёмников. При расположении сейсмоприёмников на льду водоёма, который не промёрз до дна, регистрируемые колебания становятся более низкочастотными и менее разрешёнными.

Так, на рис. 4, а представлены коррелограммы, полученные на юге Сугмутской площади. Западная часть расстановки сейсмоприёмников располагалась в данном случае на суше, а восточная - на льду водоёма. Из приведённого рисунка можно видеть, что при установке сейсмоприёмников на льду, динамика

отражённых волн претерпевает заметные изменения. Так, если при регистрации колебаний на суше основная энергия отражённых волн была сосредоточена в полосе частот 25 - 55 Гц (см. рис. 4, б, график 1), то на льду аналогичные колебания имели эффективную полосу спектра в диапазоне 12 - 30 Гц (график 2).

Весьма интересной с практической точки зрения является оценка взаимосвязи между мощностью снежного покрова и динамикой вибросейсмических записей. Результаты таких исследований свидетельствуют о том, что при хорошей накатке снега, с увеличением исходной мощности снега от 0 до 1 м качество первичных вибросейсмических материалов изменяется весьма незначительно [3]. Вместе с тем качественная накатка позволяет в 2-3 раза увеличить амплитуду возбуждаемых колебаний и соответственно повысить помехоустойчивость метода. Так, на рис. 5 приведены коррелограммы, зарегистрированные без предварительного уплотнения снега (а) и с уплотнением снега (б). В данном случае высокочастотные звуковые помехи от дизельных установок вибраторов оказывали достаточно сильное мешающее влияние на полезную запись. В результа-



▲ Рис. 4. Изменение динамики коррелограмм при переходе расстановки сейсмоприёмников с суши на лёд водоёма: а – исходные сейсмограммы; б – амплитудные спектры отражений ($t = 1,9 - 2,3$ с) при установке сейсмоприёмников на суше (1) и на льду (2).

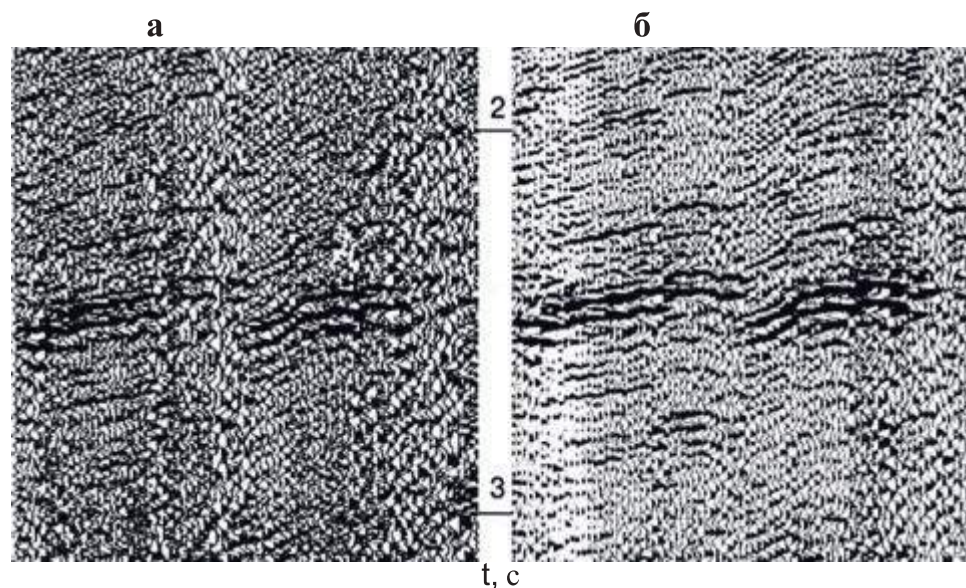
те предварительного уплотнения снега удалось увеличить уровень возбуждаемых упругих колебаний и тем самым ослабить влияние звуковых помех.

Таким образом, существование в условиях Крайнего Севера мощного слоя

снега и необходимость его уплотнения несколько усложняет технологию проведения работ. Вместе с тем выполненные к настоящему времени исследования свидетельствуют о том, что однородный мощный слой снега существенно уменьшает дисперсию характеристик колебательной системы вибратор-грунт вдоль профиля. Поэтому, сигналы, возбуждаемые на участках суши при вибросейсмических наблюдениях в районах Крайнего Севера отличаются, как правило, высокой стабильностью динамических параметров, что, безусловно, способствует повышению эффективности сейсмической разведки.

При этом важно отметить, что уплотнение снега вдоль профиля необходимо не только для того, чтобы повысить уровень сейсмических колебаний, но и для уменьшения амплитудно-частотных и фазовых искажений сигнала. Так, на рис. 6 приведены результаты тестирования одного из вибраторов СВС-15/150 на участке профиля, для которого накатка осуществлялась тяжёлой гусеничной техникой ежедневно в течение двух недель (а), а также на участке профиля, на котором накатка осуществлялась в течение одного дня (б).

Из рис. 6, б можно видеть, что в конкретном случае вследствие некачественного уплотнения снега абсолютные фазовые искажения вибросейсмического сигнала



◀ Рис. 5. Влияние уплотнения снега на интенсивность колебаний: а – уплотнение снега не проводилось; б – снег уплотнялся путём предварительных вибрационных воздействий.

превышали 25 градусов (см. график 2), неравномерность же силовой амплитудно-частотной характеристики в полосе частот развёртки достигала 10 дБ (см. график 3). Столь значительные искажения формы вибросейсмического сигнала, возникающие при установке вибраторов на рыхлом снегу, приводили к искажениям формы корреляционной функции. Так, в области главного максимума корреляционной функции уровень побочных пульсаций возрастал в 2 раза (см. рис. 6, а, б, график 1). В дальней зоне корреляционной функции также формировались интенсивные помехи корреляционного преобразования.

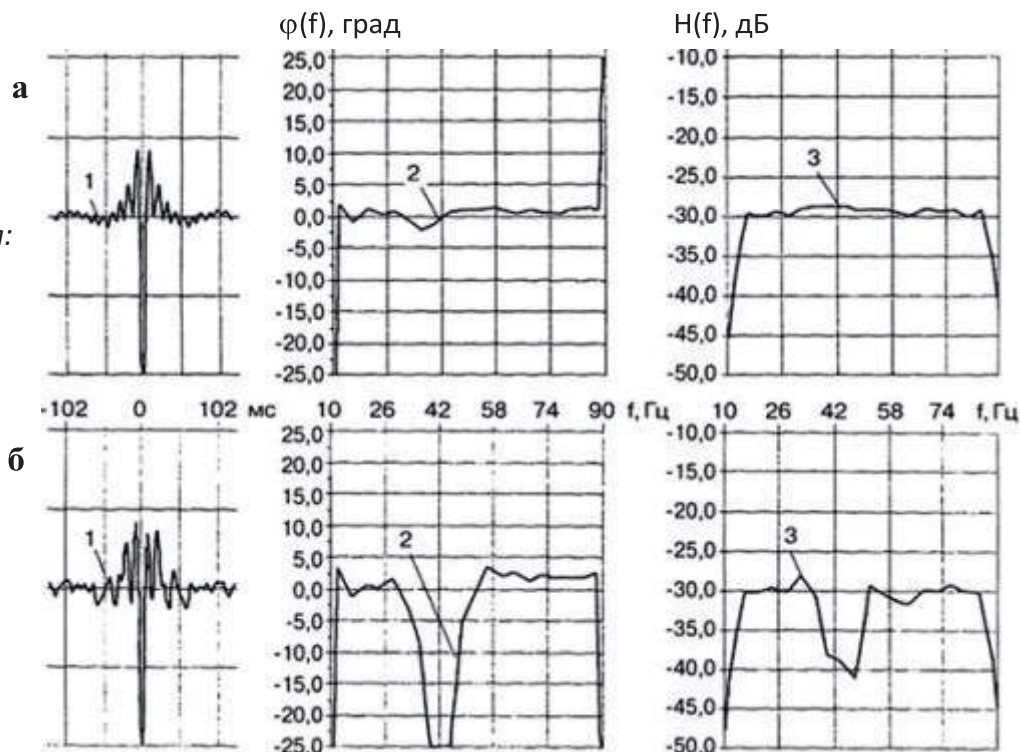
В тундровой зоне Крайнего Севера значительные искажения динамики возбуждаемых вибросейсмических колебаний могут быть связаны с повышенной шероховатостью дневной поверхности. Так, поздней осенью и на начальных стадиях зимнего периода, когда верхний слой грунта уже промёрз, однако снег ещё в достаточной мере не выровнял дневную поверхность, тундра во многих случаях представляет из себя ландшафт, состоящий из бесчисленного числа кочек. При этом существующие на сегодня экологи-

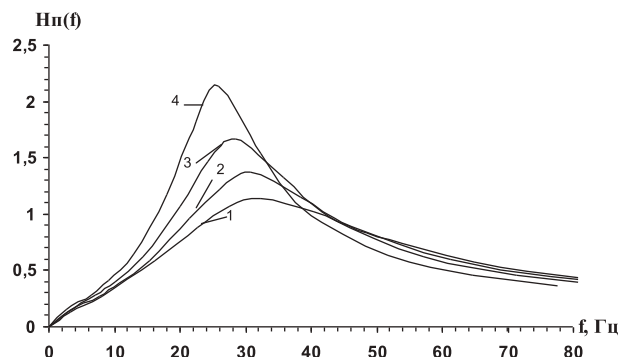
ческие требования запрещают сглаживать поверхность профиля путём срезания приповерхностного слоя. Поэтому вибросейсмические исследования, выполняемые в тундре в это время года, могут проводиться при установке вибраторов на грунте, отличающемся повышенной шероховатостью.

Теоретические оценки частотных искажений вибросейсмического сигнала в зависимости от шероховатости грунта были выполнены с использованием аналитического выражения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) вибратора для опорной плиты, приведённого в работе [4] и полученного на основании решения системы уравнений динамики силовой части излучателя. Графики АЧХ вибратора для излучающей плиты при различных значениях шероховатости грунта L приведены на рис. 7.

Под шероховатостью грунта понималось соотношение $L = (S_{\Pi} - S_K) / S_{\Pi}$, где S_{Π} – площадь плиты, а S_K – площадь плиты, контактирующая с грунтом. При вычислении графиков параметры возбuditеля вибраций задавались с учётом конструктивных особенностей арктического вибратора CBC24/PC27: масса инерционного

► Рис. 6. Искажения вибросейсмического сигнала, связанные с некачественной накаткой профиля: а, б – тесты вибратора на хорошо (а) и плохо (б) накатанном профиле.





▲ Рис. 7. Теоретические графики АЧХ колебательной системы вибратор - грунт для излучающей плиты, рассчитанные при различных значениях шероховатости грунта L : 1 – $L = 0$; 2 – $L = 0,2$; 3 – $L = 0,4$; 4 – $L = 0,6$.

груза $m_H = 4000$ кг; масса плиты $m_H = 2500$ кг; масса транспортного средства $m_T = 25000$ кг; $S_H = 2,7$ м². Коэффициенты упругости и демпфирования в системе «инерционный груз – плита» задавались соответственно равными: $k_H = 0,5 \cdot 10^6$ н/м и $f_H = 0,2 \cdot 10^5$ н с/м, а в системе «плита – транспортное средство» $k_T = 1 \cdot 10^6$ н/м и $f_T = 1,2 \cdot 10^4$ н с/м. Физико-механические свойства грунта определялись параметрами: модуль Юнга $E = 5 \cdot 10^7$ н/м²; плотность грунта $\rho = 1600$ кг/м³; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Из рис. 7 следует, что по мере увеличения шероховатости грунта происходит усиление резонансных свойств колебательной системы вибратора. Так, ширина полосы пропускания на уровне 0,7 от максимальных значений АЧХ для конкретной модели уменьшается на 17% при шероховатости грунта $L = 0,2$; на 33% при $L = 0,4$ и на 54% при $L = 0,6$.

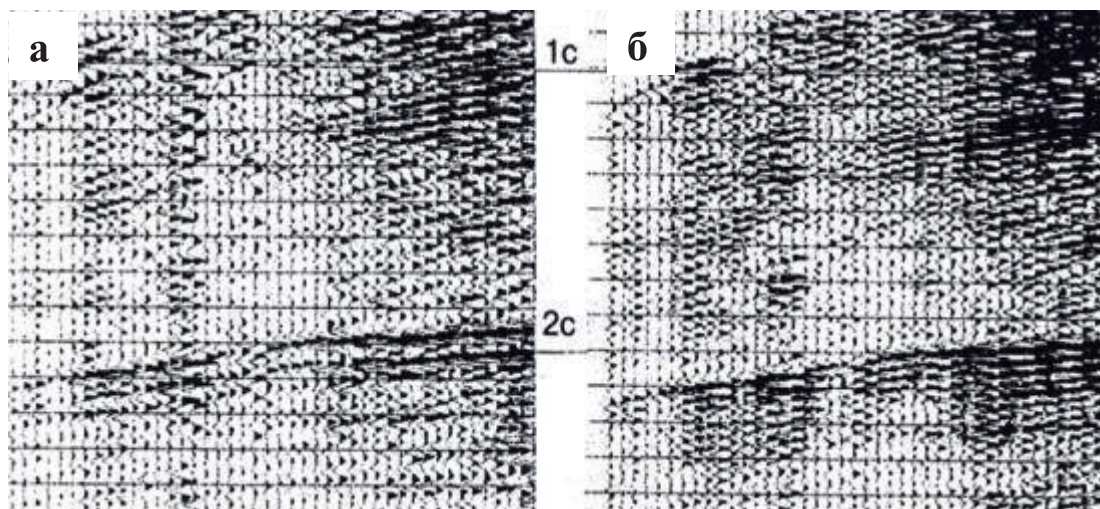
Эксперименты по оценке влияния шероховатости грунта на параметры возбуждаемых колебаний были выполнены на участках Западно-Губкинской площади, характеризующихся благоприятными сейсмогеологическими условиями. Работы проводились ЗАО «Сибнефтегазгеофизика» по заказу ОАО «Роснефть-Пурнефтегаз». Для возбуждения колебаний использовались 3 вибратора СВС24/РС27.

При проведении экспериментов сейсмические наблюдения выполнялись дважды: в первом случае, вибраторы располагались на ненарушенном грунте (на кочках, $L \approx 0,5 - 0,6$), во втором смещались на 3 – 5 м перпендикулярно линии профиля и устанавливались на специально подготовленных площадках с плоской поверхностью. Выравнивание поверхности грунта на таких площадках осуществлялось путём срезания приповерхностного слоя бульдозером.

Типичные сейсмограммы, зарегистрированные в результате проведённых экспериментов, приведены на рис. 8. Сравнительный анализ сейсмограмм свидетельствует о том, что при переходе на грунт повышенной шероховатости регистрируемые сигналы практически не изменяются по интенсивности, однако становятся более узкополосными и по этой причине, более многофазными и менее разрешёнными. Подобные результаты эксперимента физически вполне объяснимы результатами выполненного теоретического анализа и, в основном, не противоречат зависимостям, приведённым на рис. 7.

Незначительные различия теоретических и экспериментальных оценок влияния шероховатости на динамику возбуждаемых сигналов заключаются в том, что в первом случае резонансная частота колебаний с ростом шероховатости смещается на единицы герц влево, а во втором - вправо, в область высоких частот. Физически такое несоответствие связано с тем, что рост шероховатости обуславливает в свою очередь уменьшение присоединённой массы грунта и, как следствие, незначительное повышение резонансной частоты системы вибратор-грунт. Это обстоятельство в использованной теоретической модели не учитывалось.

Итак, по мере увеличения шероховатости грунта происходит усиление резонансных свойств колебательной системы



▲ Рис. 8. Коррелограммы, зарегистрированные при различной шероховатости грунта: а – шероховатость грунта $L = 0$; б – $L = 0,5 - 0,6$.

вибратор-грунт. Регистрируемые вибросейсмические сигналы при этом практически не изменяются по интенсивности, однако, становятся более узкополосными и многофазными, то есть повышение шероховатости грунта приводит к ухудшению динамических характеристик формируемых колебаний.

Помимо обострения резонанса колебательной системы вибратор-грунт с увеличением шероховатости при прохождении высокочастотных интервалов развёртки усиливаются, так называемые, изгибные вибрации опорной плиты, формирующие повышенный фон чётных гармоник. Дополнительно такие вибрации формируют турбулентные потоки в гидравлической системе вибратора, что в свою очередь приводит к нестабильности работы сервоклапана и к повышению уровня нечётных гармоник [2].

Таким образом, вибросейсмические наблюдения в тундровой зоне целесообразно начинать лишь после того, как снег достаточно толстым слоем покрывает землю и после накатки поверхность профиля не будет зависеть от присутствия кочек.

Литература

1. Дьяченко В.Ф., Кострыгин Ю.П., 1985, Некоторые результаты вибросейсмических наблюдений, проводимых на льду. Сб.

Нефтегазовая геология, геофизика и бурение, №7, М., ВНИИОЭНГ, с. 20-23.

2. Зхоухонг Вэй, 2008, Совершенствование сейсмического вибратора продольных волн для повышения разрешённости сейсморазведки. Приборы и системы разведочной геофизики, 01 (23).

3. Кострыгин Ю.П., 2000, Особенности волнового поля, регистрируемого при вибросейсмических наблюдениях в условиях Крайнего Севера: Российский геофизический журнал, 19-20, с. 13-20.

4. Кострыгин Ю.П., Михайлов В.В., 2002, Теоретический анализ компонент форс-сигнала, формируемого гидравлическим вибратором: Российский геофизический журнал, 25-26, с. 74-78.

5. Кузьмин П.Г., Кострыгин Ю.П., 2007, Способ сейсмической разведки при наблюдениях на поверхности льда. Россия, патент №2308057.

Подробнее об авторе



Кострыгин
Юрий Петрович

Доктор технических наук,
директор
ООО «Новоросморгео».