

К ИССЛЕДОВАНИЮ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ АЛТАЕ-САЯНСКОГО РЕГИОНА ДЛЯ РЕЖИМНЫХ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Виктор Михайлович Соловьев

Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора, тел. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Александр Федорович Еманов

Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, доктор технических наук, директор, тел. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Семен Александрович Елагин

Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, тел. (383)333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

Наталья Александровна Галева

Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Россия, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, тел. (383)330-75-68, e-mail: tatapelya@gmail.com

Приведены результаты экспериментов по исследованию характеристик излучения мощных вибраторов и условий приема на ряде сейсмостанций Алтае-Саянского региона в диапазоне удалений 50-450 километров в задаче подбора точек для активного вибросейсмического мониторинга. Показано, что реальный эффективный диапазон вибратора ЦВ-40 может быть существенно увеличен за счет использования кратных и полукратных гармоник. Предложена и опробована методика оценки применимости станций для вибромониторинга с использованием специальных программ оценки сейсмического фона и сейсмических резонансов в пределах размещения сейсмостанций.

Ключевые слова: активный вибросейсмический мониторинг, характеристики излучения вибраторов, сейсмологическая сеть, коррелограммы, кратные и полукратные гармоники, спектры, резонансы

TO STUDY THE POSSIBILITIES OF USING THE SEISMOLOGICAL NETWORK OF THE ALTAI-SAYAN REGION FOR REGIME VIBRO-SEISMIC OBSERVATIONS

Victor M. Solovyev

Altai—Sayan Branch of the FRC UGS RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., PhD, Deputy Director, tel. (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Aleksandr F. Emanov

Altai—Sayan Branch of the FRC UGS RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., DSc, Director, tel. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Semen A. Elagin

Altai—Sayan Branch of the FRC UGS RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Researcher, tel. (383)333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

Natalya A. Galyova

Altai—Sayan Branch of the FRC UGS RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Researcher, tel. (383)333-25-35, e-mail: tatapelya@gmail.com

The results of experiments on the study of the radiation characteristics of powerful vibrators and reception conditions at a number of seismic stations in the Altai-Sayan region in the range of distances of 50–450 kilometers in the problem of selecting points for active vibro-seismic monitoring are presented. It is shown that the real effective range of the CV-40 vibrator can be significantly increased by using multiple and semi-multiple harmonics. A method for assessing the applicability of stations for vibration monitoring using special programs for assessing the seismic background and seismic resonances within the boundaries of the location of seismic stations is proposed and tested.

Keywords: active vibroseismic monitoring, characteristics of vibratory radiation, seismological network, correlograms, multiple and semi-multiple harmonics, spectra, resonances

Введение

Режимные вибросейсмические исследования с мощными вибраторами в Алтае-Саянском регионе начались фактически сразу после установки 100-тонного вибратора на Быстровском полигоне в начале 80-ых годов прошлого столетия [1, 2, 7]. Первые эксперименты по изучению повторяемости волнового поля выполнялись в ближней зоне и на удалении 20 км от центробежного вибромодуля амплитудой силы в 100 тонн (ЦВ-100). С 1996 года по 2004 год со 100-тонным вибратором проводились регулярные наблюдения с интервалом в 7–10 дней на сеймостанции «Новосибирск» на удалении ~50 км; в последующем, по настоящее время, режимные наблюдения выполняются с 40-тонным вибратором ЦВ-40 [2, 5, 9]. Наряду с отработкой методики и техники режимных наблюдений изучались волновые поля от вибраторов и прохождение монохроматических сигналов по площади на удалениях до пятисот-тысячи километров. С целью расширения апертуры режимных вибросейсмических наблюдений в Алтае-Саянском регионе в последние годы были начаты исследования по выявлению сейсмологических станций с хорошим прохождением сигналов от вибратора [5, 8, 9]. Был проведен анализ прохождения монохроматических сигналов (8 Гц, 8.5 Гц, 9 Гц, 9.5 Гц, 10 Гц и 10.5 Гц) на сеймостанциях региона на удалении до 1200 км от вибратора ЦВ-40 (полигон Быстровка); установлено, что хорошее накопление монохромов от вибратора ЦВ-40 на нескольких частотах осуществляется на ряде станций до удалений ~450 км [8]. Согласно этим результатам наиболее оптимальными для вибросейсмического мониторинга могут быть сеймостанции Усть-Кан, Яйлю и Еланда, находящиеся вблизи зон с повышенной сейсмичностью на юге Алтая [8]. На этих, а также других сейсмологических станциях, необходимо продолжать исследования как по регистрации монохроматических записей в широком частотном диапазоне, так и анализу шумов в разные периоды времени. Получение качественной вибрационной коррелограммы с записями опорных Р-и S-волн на больших удалениях отличается от регистрации химического взрыва. На точке регистрации, где полностью отсутствует шум, также затруднительно получить хорошие коррелограммы, как и на точке с максимальным фоном. Обязательным условием является согласование параметров излучаемого вибратором свипа и оптимального частотного диапазона точки приема. Ниже, на

примере нескольких сейсмологических станций Алтае-Саянского региона, показана технология подбора оптимальных точек для вибрационного мониторинга.

Характеристики излучения вибратора ЦВ-40

Знание характеристик излучения вибратора в разных режимах и на разных грунтах чрезвычайно важно для получения качественных коррелограмм. При работе с 40-тонным вибратором в Алтае-Саянском регионе применялись главным образом дебалансы со статическими моментами 46.2кг•м (средние дебалансы) и 56.8кг•м (тяжелые дебалансы), с которыми были получены качественные коррелограммы на профилях и площадной сети [1, 2, 7]. Диапазоны частот зондирования выбирались в соответствии с планируемыми экспериментами и составляли, как правило, 6.25–11.23 Гц, 6.25–9.57 Гц на тяжелых дебалансах и 7.91–11.23 Гц на средних дебалансах. Контроль за излучаемым сигналом осуществлялся с использованием датчиков, установленных на платформе и под вибратором (в ближней зоне) [2, 3, 5, 7]. Время накопления сигналов составляло, в среднем, 40–60 мин. Высокая точность временной синхронизации процессов излучения и приема обеспечивалась с помощью навигационной системы GPS. Наряду с высокой стабильностью и повторяемостью вибрационных воздействий в определенные периоды (лето, зима), в экспериментах была установлена сильная изменчивость волновых полей мощных вибраторов ЦВ-100 и ЦВ-40 в ближней и дальней зонах в переходные периоды (межсезонье) [2, 5, 7]. Установлено, что на характеристики излучения вибратора сильно влияют существующие резонансы в системе вибратор-грунт [6]. Ниже, на рисунке 1 представлены результаты одного из экспериментов по изучению резонансов системы вибратор/грунт для 40-тонного виброисточника на Быстровском полигоне в летний период. В течение 3-х суток осуществлялась регистрация микросейсмиков аппаратурой «Байкал» с трехкомпонентными сейсмоприемниками СК-1П, размещенными на верхней платформе вибратора. При работающем вибраторе регистрация осуществлялась с четырех сторон вблизи от вибратора в скважинах глубиной 1.5–2 м. По результатам обработки экспериментов выделены четкие резонансы на горизонтальных приборах, ориентированных поперек и вдоль длинной стороны вибратора, соответственно узкий резонанс на частотах 7.2–7.3 Гц и широкий резонанс в полосе частот примерно от 7.8 до 10 Гц с провалом в районе 8.6–8.8 Гц; на вертикальных приборах четко фиксируются два резонанса – один узкий, примерно на 7.2–7.3 Гц, и второй широкий – в диапазоне 12–18 Гц (рис. 1).

При включении виброисточника отмечается подкачка энергии именно на этих резонансах и увеличение кратных гармоник. Было также установлено, что в диапазоне частот выше 8 Гц после некоторого подъема амплитуд происходит резкий спад на частотах 8.4–8.6 Гц. По мнению авторов, связано это с отрывом вибратора от грунта, что обусловлено совпадением излучаемого сигнала с выделенным выше резонансом в направлении вдоль длинной стороны вибратора. В момент отрыва на виброграммах и спектрах заметен как спад усиления, так и резкое возрастание полукратных и (главным образом, полуторакратных)

гармоник (рис. 2). Диапазон излучения вибратора: 6.25-11.23 Гц на рис. 2А, Б и 8.49-11.03 Гц на рис. 2В, Г.

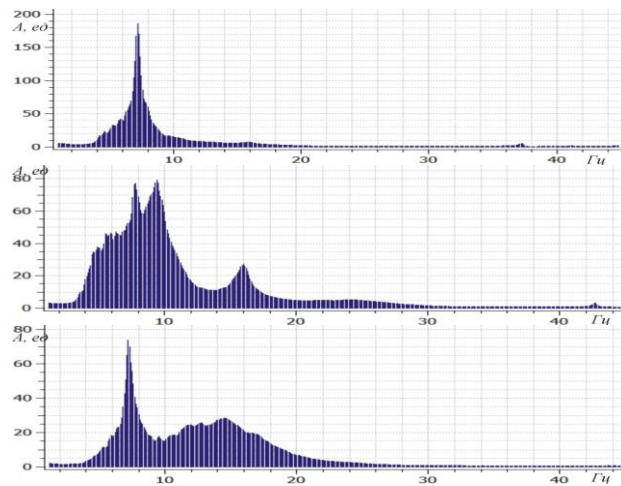


Рис. 1. Примеры спектров (с усреднением) за 12 часов с регистраторов на верхней платформе. А, Б – данные с горизонтальных каналов, направленных поперек и вдоль вибратора соответственно, В – данные с вертикального сейсмоприемника.

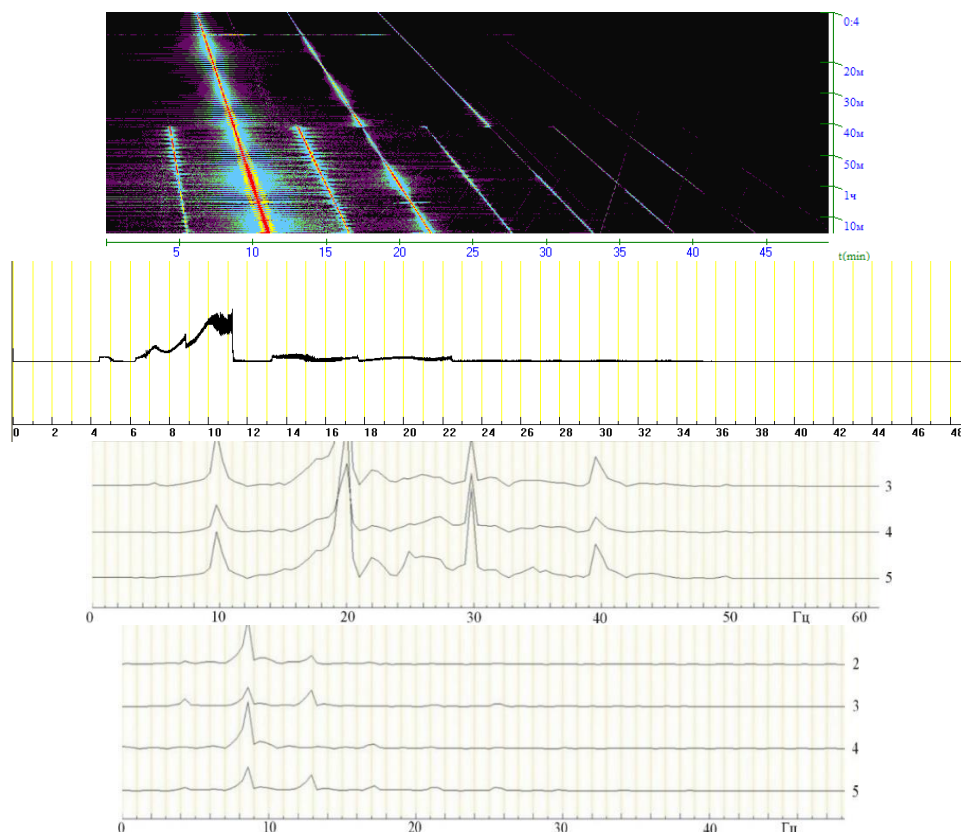


Рис. 2. К изучению характеристик излучения вибратора ЦВ-40. А, Б – примеры текущих и амплитудного спектров в ближней зоне, В, Г - примеры спектров с сильными кратными и полутора кратными гармониками соответственно для участков с резким подъемом и спадом излучения [4].

В результате эффективный диапазон излучения вибратора увеличивается в несколько раз (рис. 2А). В ряде экспериментов были получены качественные записи от вибратора ЦВ-40 на кратных и полукратных гармониках, что подтверждает сделанные выше выводы [6, 9]. Зимний период (примерно с середины декабря по середину марта) наиболее сложен для вибрационного мониторинга с вибратором на открытом грунте. Зимние сеансы показывают практическое исчезновение резонансов в системе вибратор/грунт и падение амплитуд излучения. При этом эффективный диапазон излучения сужается до 1-1.5 Гц, существенно уменьшаются кратные гармоники и полностью пропадают полукратные.

Условия приема

Условия приема также оказывают существенное влияние на качество сейсмических записей. При подборе точек с оптимальными условиями приема сигналов от вибратора требуется исследовать на них уровень сейсмического фона относительно шумов Земли (как за локальный, так и за длительный период) и провести спектральный анализ длительных записей для выявления полосы частот сигналов с наилучшим прохождением на точке регистрации. Ниже, на нескольких станциях Алтае-Саянского региона (NVS-Новосибирск, SALR – Салаир, UKR - Усть-Кан, ELT - Ельцовка), на которых были получены коррелограммы от вибратора ЦВ-40 исследовались - вероятностное распределение спектральной плотности мощности сигналов (PDF) записей сейсмостанций по методике в работе [10] и усредненные по множеству реализаций спектры, иллюстрирующие анализ шумов на выбранных сейсмостанциях и соответственно возможность получения на них разрешенных коррелограмм. На рис. 3 приведены эти данные с сейсмостанций NVS и CLR, на которых получен наибольший объем мониторинговых исследований; находятся они соответственно в северной и восточной части от вибратора ЦВ-40 на удалениях 50 км и 198 км.

Анализ распределений спектральной плотности мощности сигналов на каналах ENZ этих сейсмостанций показывает в целом даже более лучшие условия сигнал/шум на сейсмостанции Салаир, по сравнению с Новосибирском (рис. 3 А, Б). Однако по усредненным амплитудным спектрам (рис. 3 Б, В) видно, что в отличие от сейсмостанции NVS, где отмечается полочкообразная характеристика спектра в диапазоне 5-15 Гц (включающего диапазон излучения вибратора ЦВ-40 в 6.25-12 Гц) и которую (с некоторой долей условности) можно рассматривать как широкий резонанс в области приема, на усредненных спектрах сейсмостанции CLR отмечается сильный завал характеристики в диапазоне 5-15 Гц и, в особенности, в основном диапазоне работы ЦВ-40 7.91-11.23 Гц. Это можно трактовать, как более худший прием сигналов в диапазоне 8-12 Гц на сейсмостанции Салаир, по сравнению с с/ст Новосибирск. Накопленные за пятилетний период коррелограммы с этих с/станций подтверждают вышесказанное. Возможно, что для мониторинга на с/ст Салаир более эффективным будет диапазон частот излучения вибратора на тяжелых дебалансах 6.25-9.57 Гц и накопление полукратной гармоники.

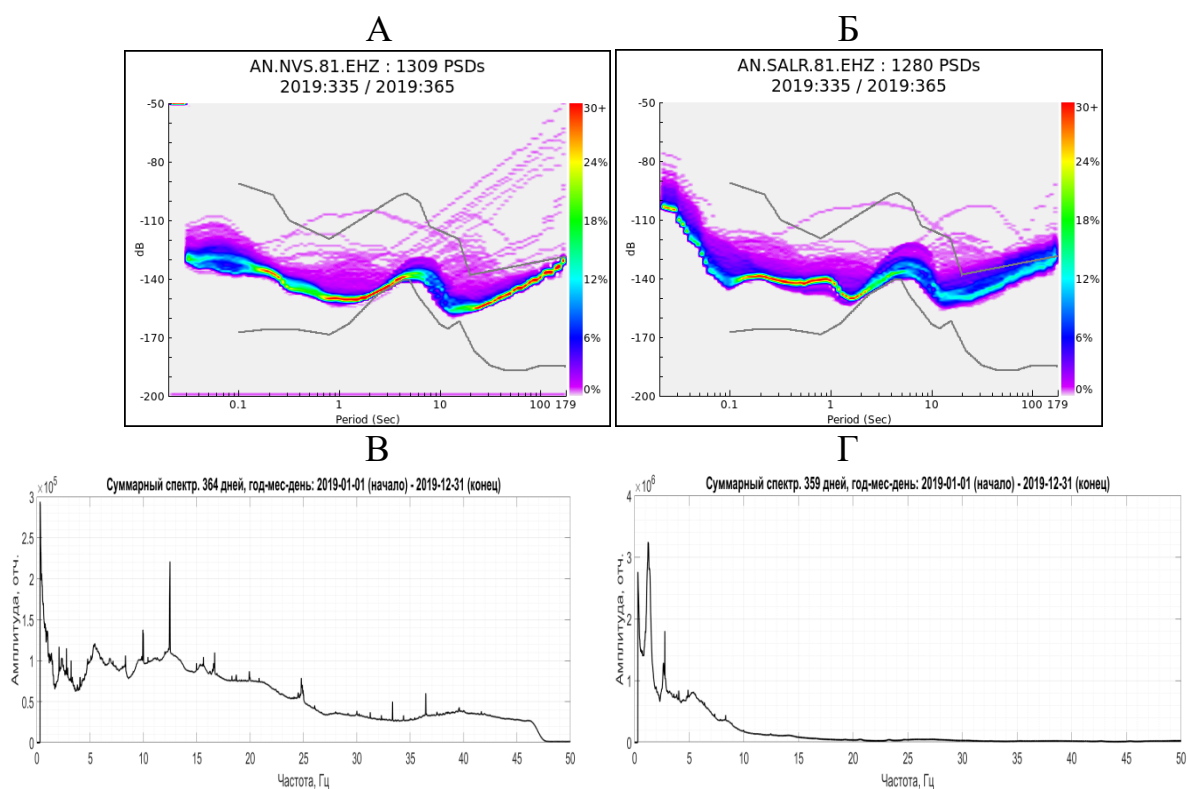


Рис. 3. К изучению влияния условий регистрации на прием вибрационных сигналов на с/ст NVS и CLR. А, Б - вероятностное распределение спектральной плотности мощности сигналов на каналах EHZ с/ст NVS и CLR соответственно (по оси Y - мощность сигналов в Db, цветом дана шкала вероятности, в процентах); В, Г - примеры усредненных амплитудных спектров) для каналов EHZ с/ст NVS и CLR соответственно.

На рис. 4 приведены результаты исследований по сейсмостанциям ELT и UKR, находящимся соответственно в юго-восточном и южном направлении от вибратора ЦВ-40 на удалениях 278 км и 429 км. Распределение спектральной плотности мощности сигналов на канале EHZ на станции UKR хуже, чем на вышеприведенных станциях NVS, CLR и ELT.

Тем не менее, на данной сейсмостанции на большом удалении от вибратора получена приличная коррелограмма с записью преломленной волны от границы Мохоровичича. Обусловлено это, по-видимому, хорошим прохождением сигналов в районе сейсмостанции Уст-Кан в диапазоне излучения вибратора ЦВ-40, что следует из графиков усредненных амплитудных спектров на рисунке 4 В, Г, где в диапазоне 10-20 Гц отмечается полочка с повышенными амплитудами усредненных спектров. На сейсмостанции Ельцовка в целом при хорошем вероятностном распределении спектральной плотности мощности сигналов на каналах за длительный период исследований не удалось накопить хороших единичных коррелограмм.

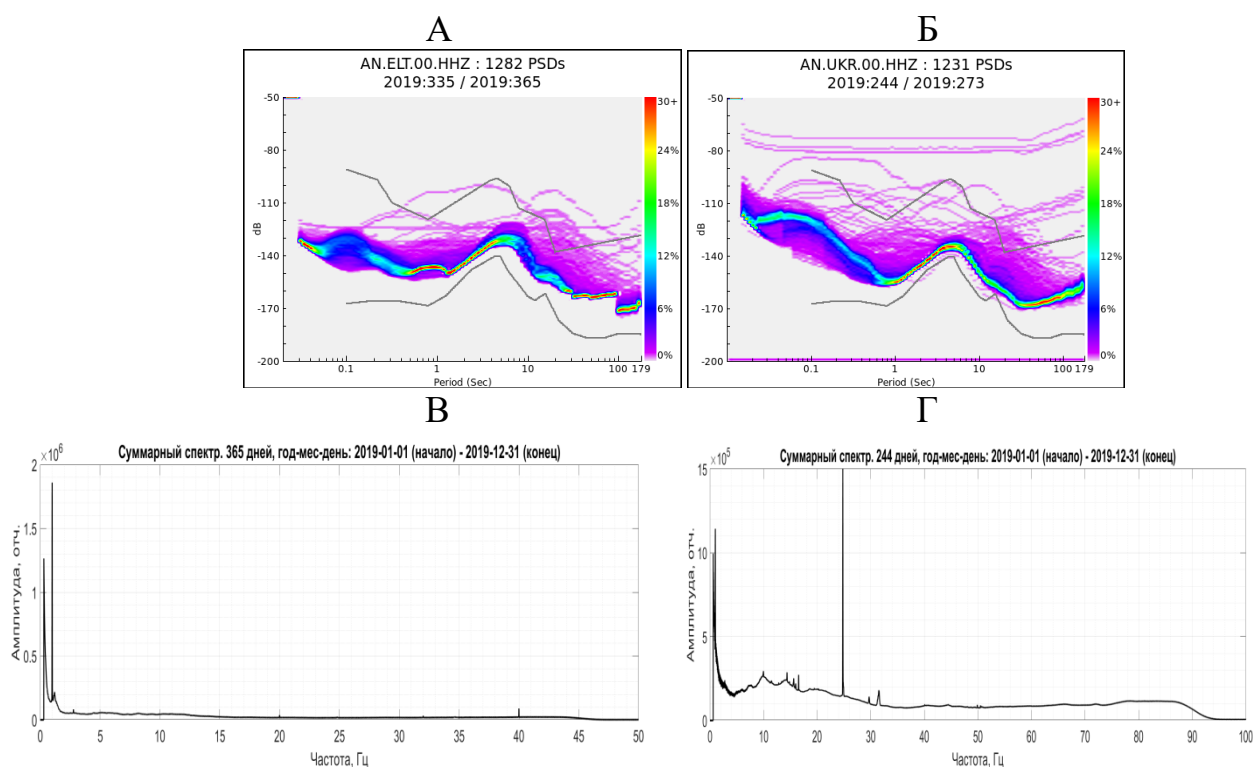


Рис. 4. К изучению влияния условий регистрации на прием вибрационных сигналов на с/ст ELT и UKR. Подписи как на рис. 3

Исследования в данном направлении только начаты. Необходимо исследовать графики вероятностных распределений спектральной плотности мощности сигналов и усредненных амплитудных спектров в разные периоды времени для выбора наиболее благоприятных условий для регистрации. В этом отношении чрезвычайный интерес представляет сейсмостанция Яйлю на озере Телецкое, на которой в 2010 году была получена рекордная (на удалении 455 км), но единственная запись преломленной волны от границы Мохоровичича от вибратора ЦВ-40 [5, 9]. По-видимому, в данный момент были наиболее оптимальные условия для приема вибросигналов. Необходимо изучить в районах сейсмостанций характеристики верхней части разреза для выяснения вопросов накопления резонансов среды, которые могут давать подкачку приходящим от вибратора сигналам и многое другое.

Выводы

Значительный объем экспериментальных исследований с мощными вибраторами в Сибири свидетельствует об отсутствии унифицированных режимов излучения при круглогодичных вибросейсмических просвечиваниях значительных территорий. Сильно меняются излучаемые сигналы в районе виброисточника и значительно неоднородны условия приема – от скальных грунтов на юге Алтая до низкоскоростной мощной осадочной толщи в Кузбассе. Представленная в статье методика оценки приемлемости для мониторинга сейсмостанций основана на

специальной технологии анализа шумов и резонансов в области приема как за длительный, так и за короткий период. Показано, что для получения качественных коррелограмм под конкретную станцию нужно подбирать оптимальный излучающий свип в каждый конкретный временной период. Необходимо продолжение как теоретических исследований в данном направлении, так и полевых экспериментов с разными режимами излучения.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01304-20) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Манштейн А.К., Селезнев В.С., Сердюков С.В., Соловьев В.М., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Юшин В.И. Новые геотехнологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер // Вибрационные геотехнологии. Мин-во промышленности, науки и технологий РФ. – Москва. – 2002. – 474 с.
2. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли. Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2010. – 310 с.
3. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Кашун В.Н., Татьков Г.И., Чичинин И.С., Жемчугова И.В., Скоринский Д.В., Яковлев О.Л., Тубанов Ц.А. Эксперименты по вибросейсмическому мониторингу земной коры // В сборнике: Проблемы региональной геофизики. Материалы геофизической конференции, посвященной 70-летию со дня рождения С.В. Крылова. – 2001. – С. 55-58.
4. Селезнев В.С., Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Ефимов А.С., Сальников А.С., Чичинин И.С., Кашун В.Н., Романенко И.Е., Елагин С.А., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е., Сережников Н.А., Максимов М.А. Глубинные вибросейсмические исследования на Дальнем Востоке России // Проблемы информатики. – 2013. – № 3 (20). – С. 30-41.
5. Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М., Сальников А.С., Юшин В.И., Кашун В.Н., Елагин С.А., Галёва Н.А. Активная сейсмология и ГСЗ с мощными вибраторами в Сибири // Проблемы информатики. г. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН. – 2018. – №4. – С. 347-354.
6. Соловьев В.М., Кашун В.Н., Романенко И.Е., Елагин С.А., Шенмайер А.Е., Сережников Н.А. Особенности излучения мощных вибраторов на неоднородных грунтах и некоторые технологические приемы повышения эффективности излучения при глубинных сейсмических исследованиях и активном мониторинге среды // Проблемы информатики. – №1. – 2016. – С.58-72.
7. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Жемчугова И.В. Активный вибросейсмический мониторинг в северо-западной части Алтае-Саянской складчатой области // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: Материалы 2-го Международного симпозиума. Новосибирск: Издательство СО РАН. – 2005. – С. 64-70.
8. Соловьёв В.М., Еманов А.Ф., Елагин С.А., Галёва Н.А. Развитие сети вибромониторинга в сейсмоактивном Алтае-Саянском регионе // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XV Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 24-26 апреля 2019 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 9 т.. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 46-55.

9. Soloviev V.M., Seleznev V.S., Emanov A.F., Yushin V.I., Kashun V.N., Elagin S.A., Liseikin A.V. Wave fields from powerful vibrators in active seismology and depth seismic researches. «Active Geophysical Monitoring, Second Edition» edited by Junzo Kasahara, Michael S. Zhdanov, Hitoshi Mikada. – The Netherlands: Elsevier, 2019. – P. 389-404.
10. McNamara D.E., Buland R.P. Ambient Noise Levels in the Continental United States // Bull. Seism. Soc. Am. – 2004. – 94, 4. – P. 1517–1527.

REFERENCES

1. Alekseev A.S., Glinskij B.M., Emanov A.F., Kashun V.N., Kovalevskij V.V., Manshtejn A.K., Seleznev V.S., Serdyukov S.V., Solov'ev V.M., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Hajretdinov M.S., CHichinin I.S., YUshin V.I. Novye geotekhnologii i kompleksnye geofizicheskie metody izucheniya vnutrennej struktury i dinamiki geosfer // Vibracionnye geotekhnologii. Min-vo promyshlennosti, nauki i tekhnologii RF. – Moskva. – 2002. – 474 s.
2. Alekseev A.S., Glinskij B.M., Kovalevskij V.V., Hajretdinov M.S., CHichinin I.S., Emanov A.F., Seleznev V.S., Solov'ev V.M. Metody resheniya pryamyh i obratnyh zadach sejsmologii, elektromagnetizma i eksperimental'nye issledovaniya v problemah izucheniya geodinamicheskikh processov v kore i verhnjej mantii Zemli. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. – 2010. – 310 s.
3. Emanov A.F., Seleznev V.S., Solov'ev V.M., Kashun V.N., Tat'kov G.I., CHichinin I.S., ZHemchugova I.V., Skorinskij D.V., YAKovlev O.L., Tubanov C.A. Eksperimenty po vibrosejsmicheskomu monitoringu zemnoj kory // V sbornike: Problemy regional'noj geofiziki. Materialy geofizicheskoy konferencii, posvyashchennoj 70-letiyu so dnya rozhdeniya S.V. Krylova. – 2001. – S. 55-58.
4. Seleznev V.S., Solov'ev V.M., Emanov A.F., Efimov A.S., Sal'nikov A.S., CHichinin I.S., Kashun V.N., Romanenko I.E., Elagin S.A., Lisejkin A.V., SHenmajer A.E., Serezhnikov N.A., Maksimov M.A. Glubinnye vibrosejsmicheskie issledovaniya na Dal'nem Vostoke Rossii // Problemy informatiki. – 2013. – № 3 (20). – S. 30-41.
5. Seleznev V.S., Emanov A.F., Solov'ev V.M., Sal'nikov A.S., YUshin V.I., Kashun V.N., Elagin S.A., Galyova N.A. Aktivnaya sejsmologiya i GSZ s moshchnymi vibratorami v Sibiri // Problemy informatiki. g. Novosibirsk, IVMiMG SO RAN. – 2018. – N4. – S. 347-354.
6. Solov'ev V.M., Kashun V.N., Romanenko I.E., Elagin S.A., SHenmajer A.E., Serezhnikov N.A. Osobennosti izlucheniya moshchnyh vibratorov na neodnorodnyh gruntah i nekotorye tekhnologicheskie priemy povysheniya effektivnosti izlucheniya pri glubinnym sejsmicheskim issledovaniyam i aktivnom monitoringe srede // Problemy informatiki. – №1. – 2016. – S.58-72.
7. Solov'ev V.M., Seleznev V.S., Emanov A.F., Kashun V.N., ZHemchugova I.V. Aktivnyj vibrosejsmicheskij monitoring v severo-zapadnoj chasti Altae-Sayanskoj skladchatoj oblasti // Aktivnyj geofizicheskij monitoring litosfery Zemli: Materialy 2-go Mezhdunarodnogo simpoziuma. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN. – 2005. – S. 64-70.
8. Solov'yov V.M., Emanov A.F., Elagin S.A., Galyova N.A. Razvitie seti vibromonitoringa v sejsmoaktivnom Altae-Sayanskom regione // Interekspo GEO-Sibir': XV Mezhdunar. nauch. kongr. (g. Novosibirsk, 24-26 aprelya 2019 g.): Mezhdunar. nauch. konf. "Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Ekonomika. Geoekologiya": Sbornik materialov v 9 t.. – 2019. – T. 2. – № 2. – S. 46-55.
9. Soloviev V.M., Seleznev V.S., Emanov A.F., Yushin V.I., Kashun V.N., Elagin S.A., Liseikin A.V. Wave fields from powerful vibrators in active seismology and depth seismic researches. «Active Geophysical Monitoring, Second Edition» edited by Junzo Kasahara, Michael S. Zhdanov, Hitoshi Mikada. – The Netherlands: Elsevier, 2019. – P. 389-404.
10. McNamara D.E., Buland R.P. Ambient Noise Levels in the Continental United States // Bull. Seism. Soc. Am. – 2004. – 94, 4. – P. 1517–1527.