

РАЗВИТИЕ СЕТИ АКТИВНОГО ВИБРОМОНИТОРИНГА В СЕЙСМОАКТИВНОМ АЛТАЕ-САЯНСКОМ РЕГИОНЕ

Виктор Михайлович Соловьев

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. 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 Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, директор, тел. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Семен Александрович Елагин

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

Наталья Александровна Галёва

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-75-68, e-mail: tatapelya@gmail.com

Приведены основные результаты вибросейсмических исследований с мощными дебалансными вибраторами в Алтае-Саянском регионе. Описана методика мониторинга, точность мониторинга и повторяемость, особенности излучения на разных грунтах и при их сезонных изменениях. Представлена реализуемая схема активного вибросейсмического мониторинга на сети сейсмологических станций по изучению зон природных землетрясений на юге Алтая и техногенных землетрясений в Кузбассе и под Новосибирском.

Ключевые слова: активный вибросейсмический мониторинг, ближняя зона, характеристики излучения, монохром, коррелограмма, сеть мониторинга, дебалансный вибратор.

DEVELOPMENT OF ACTIVE VIBROMONITORING NETWORK AT THE SEISMICALLY ACTIVE ALTAI-SAYAN REGION

Victor M. Solovyev

Altay-Sayan Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptuyug, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Deputy Director, phone: (383)330-75-68, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Aleksandr F. Emanov

Altay-Sayan Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptuyug, Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Director, phone: (383)333-27-08, e-mail: solov@gs.nsc.ru

Semen A. Elagin

Altay-Sayan Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptyug, Novosibirsk, 630090, Russia, Senior Engineer, phone: (383)333-25-35, e-mail: maelstrom@gs.nsc.ru

Natalya A. Galyova

Altay-Sayan Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptyug, Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383)330-75-68, e-mail: tatapelya@gmail.com

This research explores vibroseismic monitoring results using heavyweight eccentric mass vibrators at the Altai-Sayan region. We describe our monitoring methods, compare vibration and chemical explosion source wavefields, accuracy and repeatability aspects. A monitoring network at south Altai, Kuzbas region and Novosibirsk is presented. This network provides information about man-made seismic activity and natural earthquakes.

Key words: active vibroseismic monitoring, vibroseismic zone near source, vibration source characteristics, monochromic signal, correlogram, seismic network, eccentric mass vibrators.

Введение

Опыт применения мощных вибраторов развивался в Сибири в двух направлениях. В первом они использовались, как источники колебаний при региональном изучении структуры земной коры и верхов мантии. Были получены уверенные доказательства его применения в виде вибросейсмограмм достаточно высокого качества на расстояниях до 450 км (сравнимых по качеству с записями от взрывов в водоемах и скважинах [1, 2]) и в монохроматическом режиме до 1000 км [1, 2, 12]. Проведены многочисленные полевые наблюдения в различных регионах Сибири и получен ряд интересных результатов [1, 2, 7, 10].

Второе направление связано с «активным вибросейсмическим мониторингом», обусловленным высокой повторяемостью волнового поля, что предполагалось использовать при изучении изменений напряженного состояния земной коры сейсмоактивных районов [1-3]. Исследования в этом направлении показали значительную зависимость возбуждаемых колебаний от места расположения вибратора, от типа и состояния грунта под его платформой в зависимости от времени года [4, 5, 7-11].

Изменения характеристик излучающего сигнала в ближней зоне источника изучены достаточно полно в разнообразных условиях и выработаны критерии выбора оптимальных мест установки вибраторов. Многообещающий результат для изучения состояния среды получен из длинных рядов повторных вибросейсмических записей в виде признаков лунно-солнечных вариаций [1, 2, 13].

В процессе многочисленных полевых наблюдений обнаружена необходимость специального выбора места установок не только для вибраторов, но и регистрирующих станций. Они должны характеризоваться не только низким уровнем помех, но и особой тензочувствительностью среды. В результате ряда полевых экспериментов, определен ряд таких участков, пригодных для прове-

дения мониторинга состояния среды в сейсмоактивных районах Алтае-Саянской области. Особое значение при этом имеет, обнаружение эффектов, связанных с техногенной сейсмичностью в районах с активной разработкой месторождений полезных ископаемых [6].

Ниже кратко сформулированы главные результаты исследований с вибраторами (которые имеют важное значение при выполнении мониторинговых просвечиваний), намеченные планы и перспективы развития режимных вибросейсмических исследований в северо-западной части Алтае-Саянской области.

Основные результаты вибросейсмических исследований в Алтае-Саянском регионе

За длительный период вибросейсмических исследований в северо-западной части Алтае-Саянского региона установлено:

1. Высокая стабильность и повторяемость вибрационных воздействий, позволяющая использовать вибросейсмический метод для изучения вариаций скоростей упругих волн; результаты неоднократных многодневных экспериментов показали, что по кинематическим параметрам повторяемость волновых полей в ближней и дальней зоне составляет 10^{-3} с [1, 8, 11, 13], что на порядок меньше выявляемых по данным мониторинга сезонных вариаций времен регистрации Р- и S-волн по трассе Быстровка-Ключи вдоль Новосибирского водохранилища [3, 11] (рис. 1).

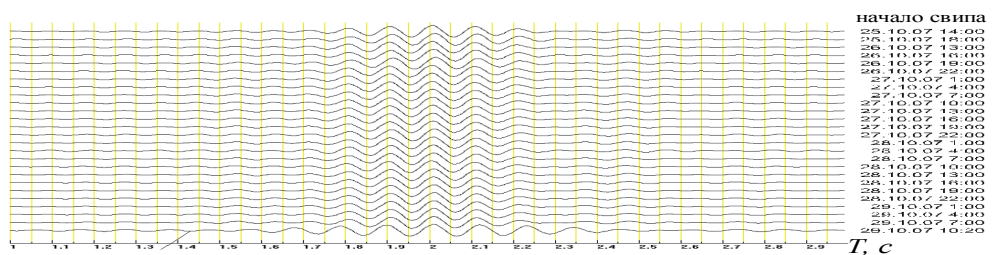
2. Изучена эффективность вибрационных воздействий при возбуждениях на различных грунтах; установлено, что на жестких грунтах спектр излучения становится узкополосным и смещен в сторону высоких частот (с максимумом излучения в диапазоне 1-2 Гц), при этом возрастает значительное количество кратных высокочастотных гармоник, что обусловлено нелинейностью работы виброисточника; на мягких осадочных грунтах (песок, глина) спектр вибратора в ближней зоне более широкополосный, а коррелограммы более компактны. Волновые поля хорошо повторяются в стабильные периоды времени года (зима, лето), но в переходные периоды (осень–зима и весна–лето), когда происходит промерзание или оттаивание грунта, наблюдается их сильное изменение [4, 7, 8, 10].

3. Отработана методика и техника режимных наблюдений. При работе с 40-тонным вибратором, как и ранее [1, 5, 8, 11], применялись дебалансы со статическими моментами 46.2кг•м (средние дебалансы) и 56.8кг•м (тяжелые дебалансы). Диапазоны частот зондирования выбирались в соответствии с планируемыми экспериментами и составляли, как правило, 6.25–11.23 Гц и 7.91–11.23 Гц. Контроль за излучаемым сигналом осуществлялся с использованием датчиков, установленных на платформе и под вибратором (в ближней зоне) [1, 5, 8, 11]. Время накопления сигналов составляло, в среднем, 40–60 мин. Высокая точность временной синхронизации процессов излучения и приема обеспечивалась с помощью навигационной системы GPS. С 2015 года под виброисточником установлен температурный зонд, который позволяет оценивать про-

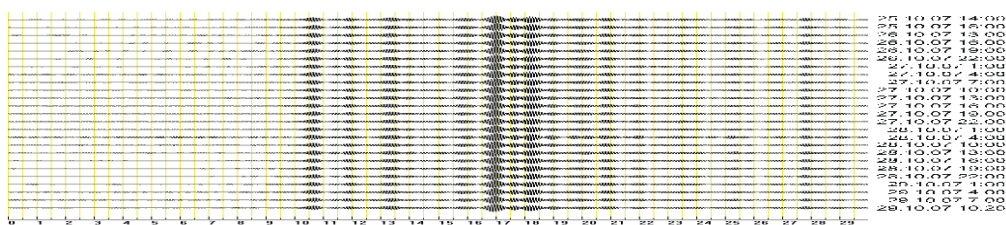
мерзание и оттаивание грунта под виброисточником во время мониторинга. Оттаивание даже малой части грунта под вибратором (~20-40 см) приводит к резкому сильному увеличению амплитуд излучения, в то время как при промерзании грунта уменьшение амплитуд происходит достаточно плавно; знание этих процессов позволяет вводить коррекции в наблюдаемые ряды мониторинга.

4. Накоплены многолетние ряды режимных наблюдений на с/ст Новосибирск по ряду трасс вибропросвечивания в районе Новосибирского водохранилища; выявлены вариации волновых полей (времен пробега Р-и S-волн, разности S-и Р –волн, отношений t_s/t_p , амплитуд, фаз и др.), связанные с сезонным изменением района размещения виброисточника [3, 8]. Использование разностных способов интерпретации рядов наблюдений с разных станций позволяет исключить влияние сезонных изменений среды в районе источника.

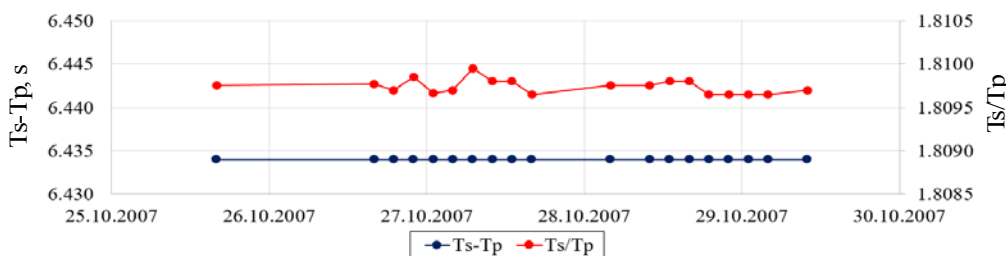
5. Изучено глубинное строение на профилях вибро-ГСЗ Быстровка-Алейск, Быстровка-Прокопьевск, Быстровка-Дегелен, Быстровка-Новокузнецк [1-3]. Знание глубинного строения при мониторинге среды чрезвычайно важно, поскольку позволяет рассчитать лучевые схемы вдоль трасс вибрационного просвечивания.



а)



б)



в)

Рис. 1. К оценке повторяемости и точности вибросейсмического мониторинга:

а), б) – примеры волновых полей от вибратора ЦВ-40 в ближней и дальней (с/ст Новосибирск) зоне при четырехдневном эксперименте; в) графики разности (нижний график) и отношений (верхний график) времен регистрации S- и Р-волн, зарегистрированных в стационарном павильоне

Развитие сети вибросейсмического мониторинга

Параллельно с проведением многочисленных экспериментов в ближней зоне 40-100-тонных вибраторов и в дальней зоне на профилях проводились исследования на площадной сети в северо-западной части Алтае-Саянского региона с целью выбора точек для режимных вибросейсмических просвечиваний, удовлетворяющие следующим условиям: они должны были приближены к зонам повышенной сейсмичности, вариации регистрируемых волновых полей в которых должны были давать информацию о природных и техногенных процессах в просвечиваемой среде; в них должны быть получены хорошие коррелограммы с записями опорных волн, и, наконец, низкая экономическая себестоимость установки и обслуживания станций. Последнее не маловажно, так как полноценное содержание стационарной сейсмологической станции требует больших затрат.

Повышенные зоны сейсмичности в Алтае-Саянском регионе – Алтай, Саяны. Проведен анализ прохождения монохроматических сигналов на сейсмостанциях Алтае-Саянского региона на удалении до 1200 км от вибратора ЦВ-40 (полигон Быстровка). Из записей станций вырезаны сеансы, проходившие в период 2016-2017 гг., которые собирались по времени в единый сеанс и строился амплитудный спектр. Каждая компонента станции считалась отдельно. Использовались 6 излучаемых по 15 минут монохроматических сигналов в оптимальном для вибратора ЦВ-40 диапазоне излучения: 8 Гц, 8.5 Гц, 9 Гц, 9.5 Гц, 10 Гц и 10.5 Гц. Отдельно по каждой из шести частот был построен график амплитуды спектра от удаления. Количество суммированных сеансов в среднем составляет на хорошо работающих станциях до 25-26 сеансов в год. Общее количество обработанных (и проанализированных) монохромов на трех компонентах за 2016-2017 гг. составило порядка 20 000. Примеры амплитудных спектров по некоторым компонентам на отдельных сейсмостанциях и сводные графики отношений амплитуд монохромов к среднеквадратическим амплитудам шумов от удалений для Алтае-Саянского региона приведены на рис. 2 и 3.

NVS, SALR, ELDR, ELT, ARTR, CERR, ERNS, BJR1 на рисунках соответственно с/ст Новосибирск (50 км), Салаир (200 км), Еланда (442 км), Ельцовка (279 км), Артыбаш (442 км), Черемушки (618 км), Эрзин (1008 км), Бачатский-1. На рис. 3 представлены данные для всех (X, Y, Z) компонент. Из рис. 3, *а* видно, что монохром 10.5 Гц хорошо проходит (отношение 2 и более) до удалений 440-450 км и даже регистрируется на удалении 620 км. Однако для получения качественных коррелограмм это недостаточно, необходимо прохождение сигналов на разных частотах.

Так, из рис. 3, *б* (в увеличенном масштабе) видно, что на удалении свыше 1000 км (с/ст Эрзин) выделяются монохромы на частоте 9.5 Гц с отношением более 2 на каналах Z и E, однако на частоте 10.5 Гц с отношением ~1.8 монохром выделяется только на канале N, а на других каналах отношение около 1 и менее. На частоте 8.5 Гц монохром вообще не проявляется (рис. 3, *б*). Получить разрешенные коррелограммы при таком слабом прохождении сигналов на разных частотах не представляется возможным. Примерно такая же ситуация

с прохождением монохромов на с/ст Черемушки (CERR, ~618 км на рис. 3). Хорошее прохождение монохрома на частоте 10.5 Гц при регистрации на Z-канале и слабое прохождение на других частотах.

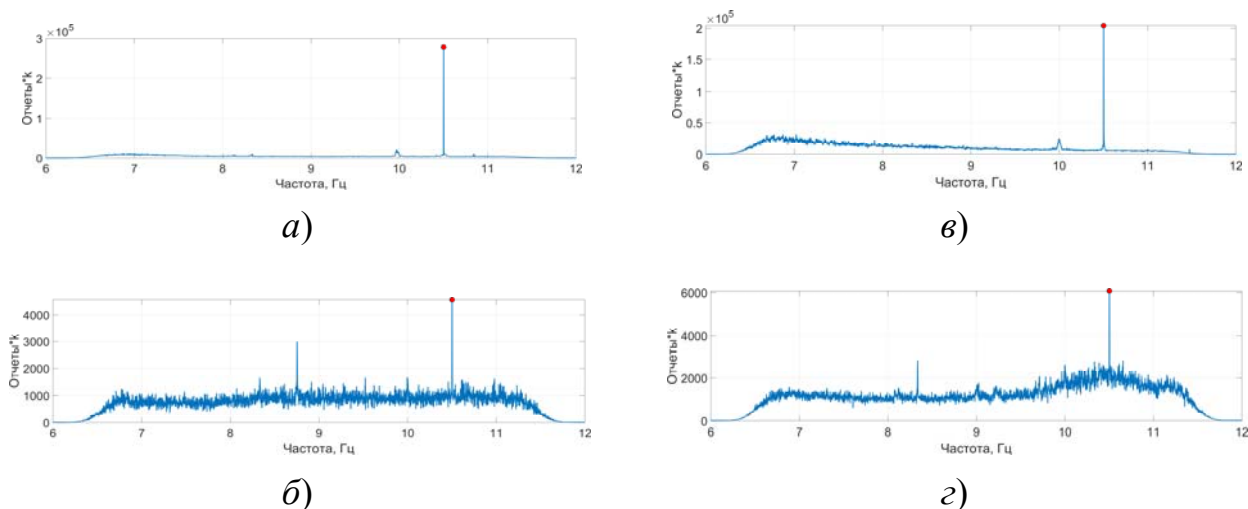
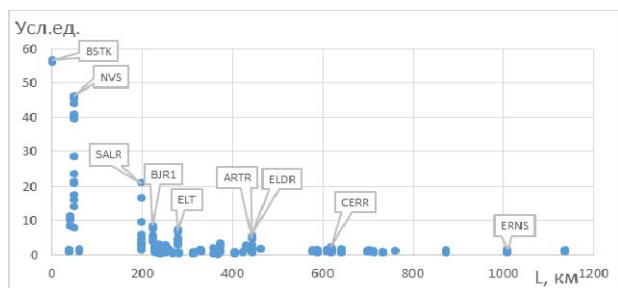
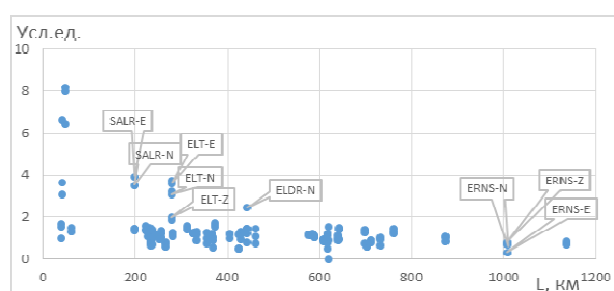


Рис. 2. Примеры регистрации монохроматических сигналов (10.5 Гц) от вибратора ЦВ-40 на сеймостанциях:

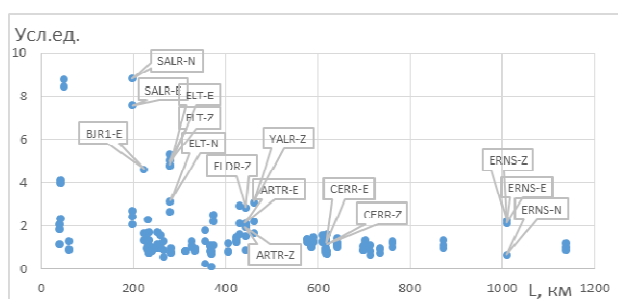
а) NVS; б) SALR; в) ELDR; з) ARTR



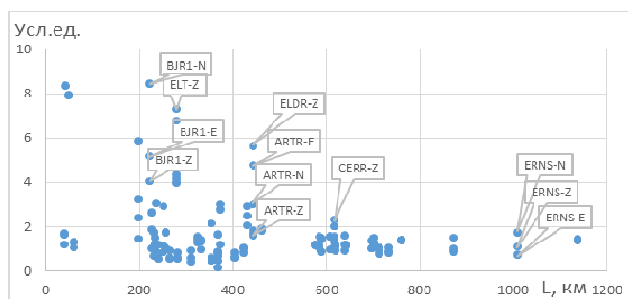
а)



в)



б)

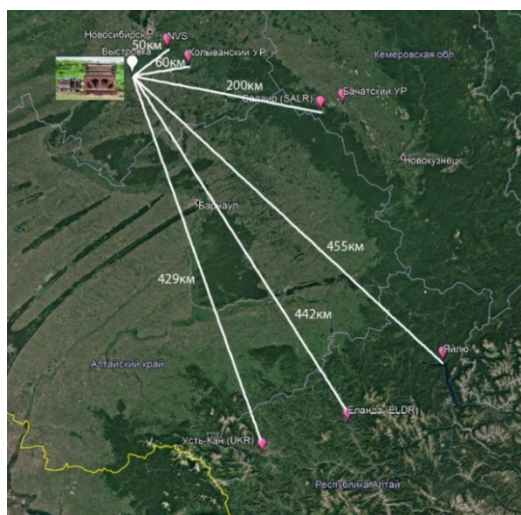


з)

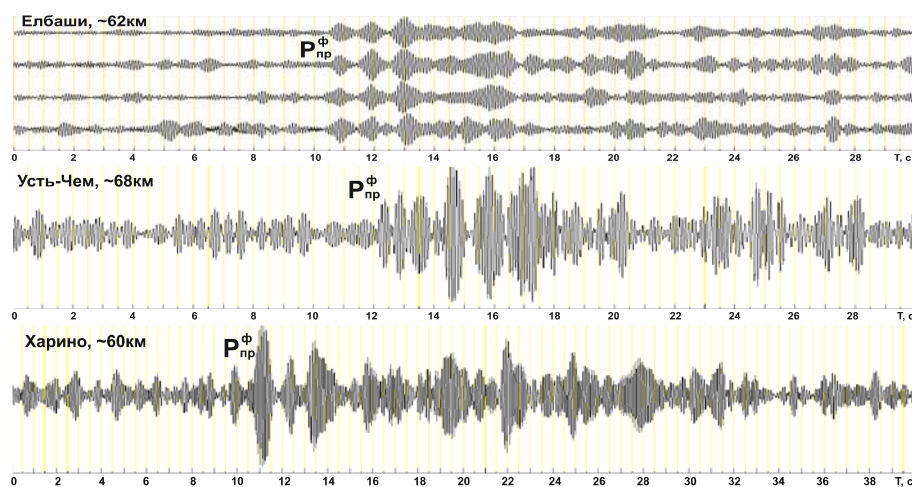
Рис. 3. Графики отношений амплитуд монохромов к среднеквадратическим амплитудам шумов в диапазоне 6-12 Гц в зависимости от удалений:

а) сводный график для частоты 10.5 Гц за 2016-2017 гг.; б), в), з) – соответственно графики для частот 8.5 Гц, 9.5 Гц и 10.5 Гц за 2017 год

По результатам проведенного анализа прохождения монохроматических сигналов на сеймостанциях Алтае-Саянского региона установлено, что хорошее накопление монохромов от вибратора ЦВ-40 на нескольких частотах осуществляется на ряде станций до удалений ~ 450 км (рис. 2, 3). Наиболее оптимальными для вибросейсмического мониторинга могут быть сеймостанции Усть-Кан, Яйлю и Еланда, находящиеся вблизи зон с повышенной сейсмичностью на юге Алтая (рис. 4, а).



а)



б)

Рис. 4. Реализуемая схема активного вибросейсмического мониторинга (а) и примеры коррелограмм в районе Колыванского разреза (б)

В последние годы значительно выросла роль техногенных факторов в возникновении сейсмичности, о чем свидетельствуют крупные техногенные землетрясения в районе разреза Бачатский в Кузбассе с $M=6.1$ (2013 год) [6]. Новая ощутимая активизация проявилась в последние годы уже в районе Новосибирска (Горловское месторождение угля), где зафиксированы ощутимые техноген-

ные землетрясения с магнитудой 3.7 в 2017 году, 3.9 в 2018 году и 4.3 в январе 2019 года. С целью обеспечения лучшей представительности регистрации землетрясений в районах разработки крупных угольных разрезов создаются локальные микрогруппы до 10-20 станций. Подобная локальная сеть в течении нескольких лет работает в Кузбассе. В 2017 году начато создание локальной микрогруппы в районе Колыванского угольного разреза между Искитимом и Академгородком (рис. 4, а). Необходимо также отметить, что в данном районе, в непосредственной близости к Новосибирску, более 100 лет назад было зафиксировано крупное историческое землетрясение с $M=5.7$. Примеры зарегистрированных здесь первых коррелограмм на удалениях 60-63 км приведены на рис. 4, б.

Можно надеяться, что накопление рядов режимных вибросейсмических наблюдений на станциях Елбаша, Усть-Чем, Харино в непосредственной близости от Колыванского разреза (не более 6-10 км) позволит отследить процесс подготовки ощутимых техногенных землетрясений в осадочной толще угледобывающего карьера, тем более что трасса мониторинга на станцию Усть-Чем фактически проходит через сам разрез. В период отсутствия сезонных вариаций (6-7 летне-осенних месяцев) могут быть наиболее информативными динамические параметры, более чувствительные, чем кинематические, к изменениям напряженно-деформированного состояния сред [1-3, 8, 11].

Анализ графиков времен прихода продольных волн на сейсмостанции NVS показывает, что в течении года времена прихода изменяются примерно на $0.012 \div 0.014$ секунд; разность же времен прихода от повторных (через 9 часов) сеансов на с/ст Новосибирск, за этот же период существенно меньше и в, среднем, составляет около 0.003 с [8]. Примерно на такую же величину изменяется разность времен прихода продольных волн на с/ст «Салаир» и с/ст «Новосибирск». Фактически, эта величина есть точность мониторинга, установленная ранее при многодневных и многолетних экспериментах с ЦВ-40 [3, 8, 13] и в которой исключено влияние сезонных изменений в районе источника. Рассматривая подобные графики разности времен продольных волн с с/ст Харино и Усть-Чем (или Елбаша и Усть-Чем), Салаир и Новосибирск (или Салаир и Бачатский-1), Яйлю и Еланда и др., можно отследить значимые изменения в среде в непосредственной близости от станций в зонах сейсмичности на юге Алтая, районах повышенной техногенной активизации в Кузбассе и Колыванском разрезе НСО.

Выводы

В результате экспериментов по расширению апертуры режимных вибросейсмических наблюдений за счет использования сейсмологических станций с хорошим прохождением сигналов от вибратора выбраны оптимальные точки регистрации на юге Алтая в близи зон сейсмических активизаций и в районах техногенных активизаций в Кузбассе и под Новосибирском. Накопление рядов вибросейсмического мониторинга с вибратором ЦВ-40 на сети режимных

станций позволит изучать вариации волновых полей разнополяризованных Р- и S-волн, связанных с изменениями напряженно-деформированного состояния среды в очаговых зонах готовящихся природных и техногенных землетрясений, что очень важно для прогноза развития сейсмических активизаций в непосредственной близости от крупных гражданских центров Алтае-Саянского региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / Алексеев А.С., Глинский Б.М., Геза Н.И., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Манштейн, Селезнев В.С., Сердюков С.В., Соловьев В.М., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Юшин В.И. // Новосибирск: Изд-во СО РАН «Гео». – 2004. – 350 с.
2. Новые геотехнологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер / 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. // Вибрационные геотехнологии. Мин-во промышленности, науки и технологий РФ. – Москва. – 2002. – 474 с.
3. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли / Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М. // Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2010. – 310 с.
4. Исследование динамических особенностей сезонных изменений волновых полей при вибросейсмическом мониторинге среды / Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М. и др. // Геология и геофизика. – № 3. – 1999. – С.474-486.
5. Эксперименты по вибросейсмическому мониторингу земной коры / 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. // В сборнике: Проблемы региональной геофизики. Материалы геофизической конференции, посвященной 70-летию со дня рождения С.В. Крылова. – 2001. – С. 55-58.
6. Техногенное Бочатское землетрясение 18.06.2013 г. (ML=6.1) в Кузбасе – сильнейшее в мире при добыче твердых полезных ископаемых / Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. Т.43. №4. С.34-60.
7. Глубинные вибросейсмические исследования на Дальнем Востоке России / 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., Сержников Н.А., Максимов М.А. // Проблемы информатики. – 2013. – № 3 (20). – С. 30-41.
8. Активная сейсмология и ГСЗ с мощными вибраторами в Сибири / Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М., Сальников А.С., Юшин В.И., Кашун В.Н., Елагин С.А., Галёва Н.А. // Проблемы информатики. г. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН. – 2018. – № 4. – С. 347-354.
9. О влиянии сезонных изменений среды под вибратором ЦВ-40 на характеристики его излучения (при вибросейсмическом мониторинге Алтае-Саянского региона) / В. М. Соловьев, В. Н. Кашун, С. А. Елагин, Н. А. Сержников, Н. А. Галёва, И. А. Антонов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 34–39.
10. Особенности излучения мощных вибраторов на неоднородных грунтах и некоторые технологические приемы повышения эффективности излучения при глубинных сейсмиче-

ских исследованиях и активном мониторинге среды / Соловьев В.М., Кашун В.Н., Романенко И.Е., Елагин С.А., Шенмайер А.Е., Серезников Н.А. // Проблемы информатики. – № 1. – 2016. – С.58-72.

11. Активный вибросейсмический мониторинг в северо-западной части Алтае-Саянской складчатой области / Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Жемчугова И.В. // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: Материалы 2-го Международного симпозиума. Новосибирск: Издательство СО РАН. – 2005. – С.64-70.

12. Чичинин И.С., Юшин В.И. Вибробратия. Воспоминания геофизиков. Новосибирск. Издательство Сибирского отделения Российской академии наук, 2018. – 108 с.

13. Экспериментальная оценка тензочувствительности коры в районе Байкала по данным активного вибросейсмического мониторинга и упругого прилива / Юшин В.И., Велинский В.В., Геза Н.И., Савиных В.С. // Геология и геофизика. – 1999. – т. 40, № 3. – С. 395-408.

© В. М. Соловьев, А. Ф. Еманов, С. А. Елагин, Н. А. Галёва, 2019