

*В. М. Соловьев<sup>1</sup>, А. Ф. Еманов<sup>1</sup>, В. С. Селезнев<sup>2</sup>, С. А. Елагин<sup>1</sup>, Н. А. Галева<sup>1</sup>*

## **К исследованию возможности вибросейсмического мониторинга среды участков разработки крупных угольных разрезов (Колыванского и Восточного) под Новосибирском**

<sup>1</sup>Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Сейсмологический филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

\*e-mail: solov@gs.nsc.ru

**Аннотация.** Представлены результаты режимных вибросейсмических просвечиваний с 40-тонным вибратором земной коры северо-восточного участка Горловской впадины с крупными угольными разрезами Колыванский и Восточный. Приведены примеры коррелограмм и графики времен пробега продольных волн на сейсмостанциях. Показана высокая точность мониторинга, по кинематическим параметрам (разности времен пробега продольных волн) составляющая ~0.003 с. Установлено отсутствие значимых вариаций в вибросейсмическом мониторинге на с/ст «Елбаш» вблизи разреза Колыванский, что связывается с малой областью деструкции произошедших здесь техногенных землетрясений с магнитудой до 4.3 в осадочном чехле. Обоснованы дальнейшие эксперименты по активному мониторингу среды земной коры Горловского угольного бассейна.

**Ключевые слова:** режимные вибросейсмические наблюдения, Горловский угольный бассейн, природно-техногенные землетрясения

*V. M. Solovyev<sup>1\*</sup>, A. F. Emanov<sup>1</sup>, V. S. Seleznev<sup>2</sup>, S. A. Elagin<sup>1</sup>, N. A. Galyova<sup>1</sup>*

## **To study the possibility of vibroseismic monitoring of the environment of the development sites of large coal mines – Kolyvansky and Vostochny near Novosibirsk**

<sup>1</sup>Altai-Sayan Branch of the FRC UGS RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Seismological Branch of the FRC UGS RAS, Novosibirsk, Russian Federation

\*e-mail: solov@gs.nsc.ru

**Abstract.** The results of regime vibroseismic transmissions with a 40-ton vibrator of the Earth's crust of the northeastern section of the Gorlovka depression with large coal sections Kolyvansky and Vostochny are presented. Examples of correlograms and graphs of the travel times of longitudinal waves at seismic stations are given. The high accuracy of monitoring is shown, according to kinematic parameters (the difference in the travel times of longitudinal waves) is ~0.003 s. The absence of significant variations in vibroseismic monitoring at the Elbashi site near the Kolyvansky section has been established, which is associated with a small area of destruction of man-made earthquakes with a magnitude up to 4.3 in the sedimentary cover that occurred here. Further experiments on active monitoring of the Earth's crust environment of the Gorlovka coal basin are substantiated.

**Keywords:** regime vibroseismic observations, Gorlovka coal basin, natural and man-made earthquakes

## Введение

Двадцать первое тысячелетие, наряду с гигантским прогрессом практически во всех сферах человеческой жизни, ознаменовалось дальнейшим углублением экологического кризиса, связанного как с космическими и планетарными проблемами (глобальное потепление, катастрофические землетрясения, извержения вулканов и наводнения...), так и с глобальными проблемами урбанизации. Как и в минувшем двадцатом веке идет рост мировых катастроф природно-техногенного характера, связанных с разработкой недр Земли, созданием крупных искусственных водохранилищ, развитием мегаполисов. Анализ причин многих чрезвычайных происшествий (ЧП) последних десятилетий в России можно было избежать, осуществляя как ежедневный плановый инструментальный мониторинг, так и долгосрочный геодинамический и геофизический мониторинг [1, 2, 3, 4].

Ниже представлены результаты экспериментов по исследованию возможностей использования режимных вибросейсмических наблюдений с 40-тонным вибратором ЦВ-40 с Быстровского полигона [3, 5, 6] для мониторинга среды участков размещения крупнейших угледобывающих разрезов Колыванский и Восточный на юге Новосибирска (Рис. 1).

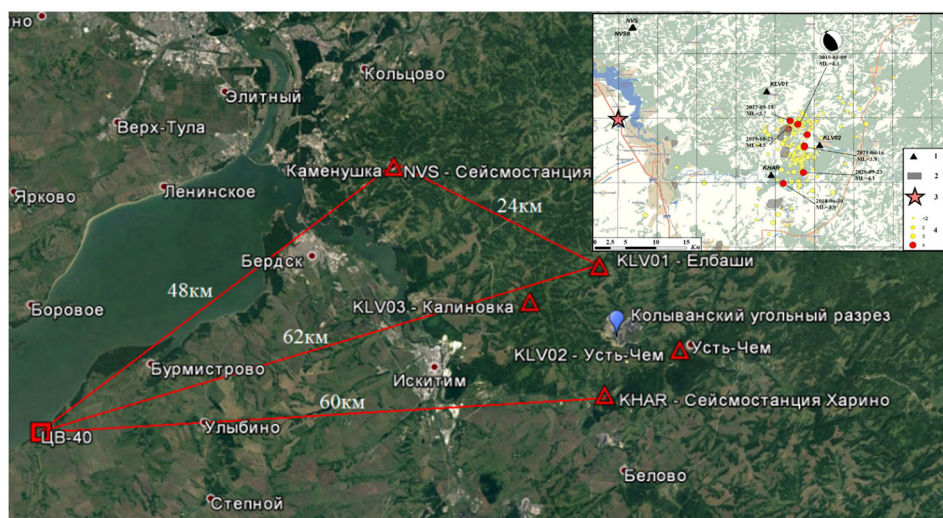


Рис. 1. Схема режимных вибросейсмических исследований в окрестности Новосибирска. На врезке - эпицентры землетрясений в районе Горловской впадины по [2]

### *Эксперименты по регистрации вибросейсмических сигналов от ЦВ-40 в Горловском угленосном бассейне*

Разрабатываемый в настоящее время Горловский угольный бассейн находится в северо-восточной части Горловской впадины, «зажатой» между Салаирским кряжем и Томь-Колыванской складчатой зоной. Для нее характерна высокая напряженность тектонических деформаций. Интенсивность разработки Горловского угольного месторождения открытым способом существенно выросла в последнее десятилетие, соответственно формируется сейсмическая активизация недр Горловской впадины в ответ на техногенное воздействие [2]. Если до 2010

г. наблюдались единичные землетрясения с магнитудами  $M_L$  не более 3.5, то уже с 2017 года в данном районе начали происходить землетрясения бóльших энергий, в том числе Колыванское землетрясение 9 января 2019 года с магнитудой  $M_L = 4.3$  и малой глубиной очага (рис. 1, врезка) [2]. Для контроля здесь сейсмического процесса АСФ ФИЦ ЕГС РАН, в дополнение к стационарным станциям «Новосибирск» (NVS) и «Харино» (KHAR), были установлены временные сейсмологические станции «Елбаши» (KLV01) и «Усть-Чем» (KLV02).

Многолетние режимные вибросейсмические наблюдения в контрольных точках («NVS» и «SLR») показали сильную сезонную изменчивость волновых полей, выраженную в изменении спектрального состава и времен прихода волн, связанные с сезонными изменениями среды в районе размещения вибратора [3, 5, 6]. На рисунке 2 приведены коррелограммы мониторинга с сейсмостанцией «NVS» и «KLV01» в 2022 году, из которых отчетливо виден сезонный тренд максимальных амплитуд продольных волн (P1 и P2) до 0.2-0.3 секунды.

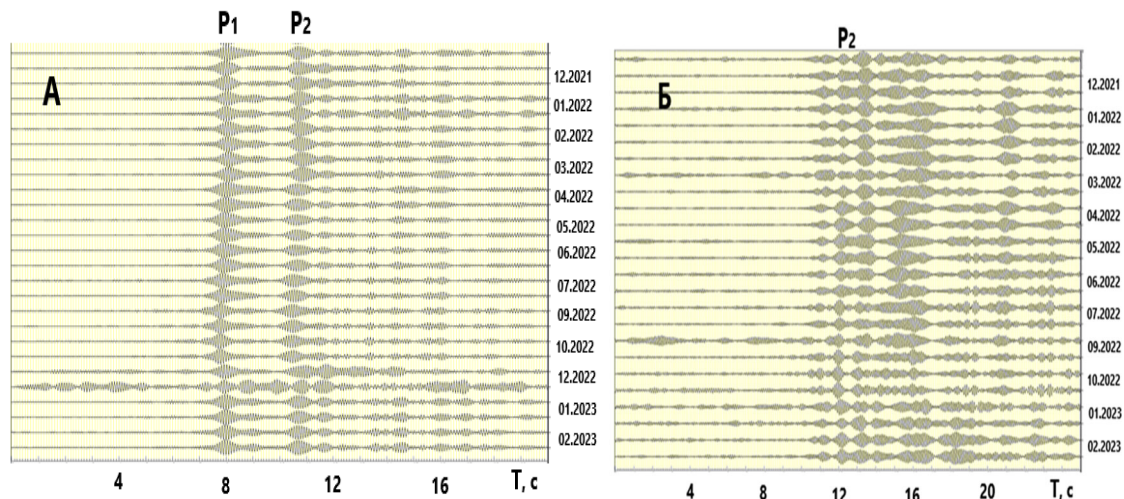


Рис. 2. Примеры коррелограмм от вибратора на с/ст NVS (А) и KLV01 (Б)

Для исключения сезонных изменений в районе виброисточника при мониторинге анализируется разность времен прихода двух волн, например, Р-и S-волн на одной коррелограмме, как это показано в [3], либо двух продольных волн, регистрируемых от вибратора на разных станциях. Так разброс значений разности времен прихода двух продольных волн на с/ст «NVS» (рефрагированной и отраженной от границы в коре, соответственно P1 и P2 на рис. 2), продольных волн на с/ст «SLR» и с/ст «NVS» за разные годы в среднем составляет около 0.003-0.005 с (рис. 3); примерно на такую же величину изменяется в среднем разность времен прихода продольных волн от повторных (через 9 часов) сеансов на с/ст «NVS» за длительный период наблюдений. Фактически, эта величина есть точность мониторинга, установленная ранее при многодневных и многолетних экспериментах с ЦВ-40 [3, 6].

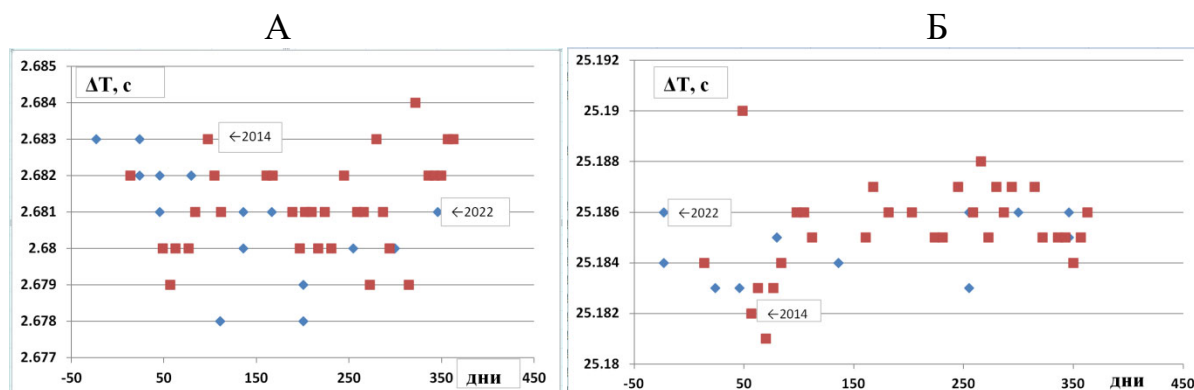


Рис. 3. Разность времен пробега волн P2 и P1 на с/ст «NVS» (А) и времен первых вступлений с сейсмостанции «SLR» и «NVS» (Б) в 2014 и 2022 гг.

При использовании для мониторинга северо-западного участка Горловской впадины данных станции «KLV01» снимались времена волны P2 (предположительно продольной отраженной волны от неглубоко залегающей границы в верхней части коры), как наиболее четко выраженной на коррелограммах по сравнению с первыми вступлениями (рис. 2Б). Разность времен регистрации максимумов волны P2 со с/ст «KLV01» и P1 с/ст «NVS» составляет в 2022 году 0.011 с при среднем значении  $\sim 4.229$  с (рис. 4)

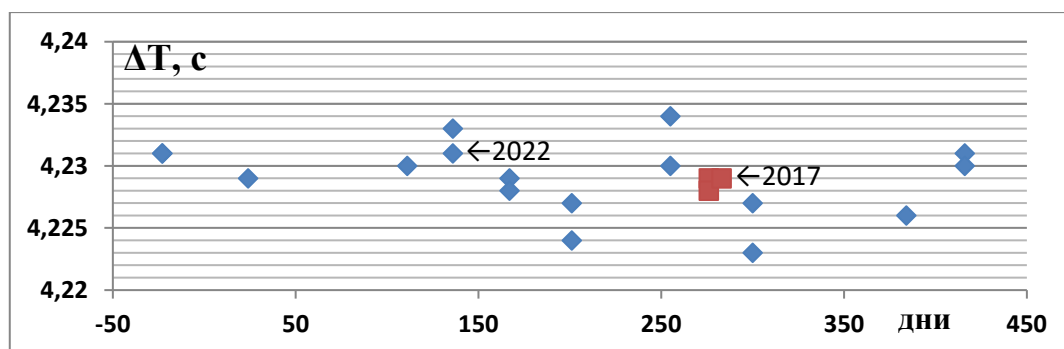


Рис. 4. График разности времен пробега волн P2 на с/ст «KLV01» и P1 на с/ст «NVS» в 2017 (красным цветом) и в 2022 (голубым цветом) годах

Такая же примерно величина разности времен в 4.228-4.229 с получена в отдельных экспериментах и в 2017 году (рис. 4).

Несмотря на повышенные разности времен со с/ст «KLV01» и «NVS», по сравнению с подобными графиками разностей времен по данным со станций «NVS» и «SLR» (рис. 3), из графика на рисунке 4 за 2017 и 2022 годы не прослеживается какой-то выраженной закономерности (тренда), что позволяет предположить об отсутствии значимых изменений упругих характеристик земной коры в пределах северо-западного участка Горловской впадины.

Чтобы понять, какие значимые вариации могут быть связаны с процессами подготовки и разрядки землетрясений в просвечиваемой вибратором земной

коре участка исследований, был рассмотрен ряд публикаций по мониторингу и прогнозу землетрясений в разных регионах России и мира [4, 7, 8, 9, 10].

Первоначально о размерах очагов землетрясений. В соответствии с мировой зависимостью из [9] средние размеры очага землетрясения ( $L$ , в км) связаны с магнитудой  $M$  соотношением:

$$\text{Lg}(L)=0.44M-1.29 \quad (1)$$

Согласно этой зависимости, размеры большинства очагов техногенных землетрясений Горловской впадины с магнитудами до 4-4.5 [2] не должны превышать 5 километров. Лишь у отдельных крупных землетрясений, как Бачатское с  $M=6.1$ , размеры готовящегося очага землетрясения могут составлять 25 километров.

При пересечении таких аномальных зон (подготовки или разгрузки землетрясений) трассами сейсмических лучей следует ожидать вариаций в волновых полях (времен пробега, амплитуд, углов выхода, спектрального состава, поляризации и т. д.) [3, 4, 10]. Применительно к кинематическим параметрам значимые вариации времен продольных волн при вибросейсмическом мониторинге Горловского угленосного бассейна должны превышать точность измерений и составлять хотя бы  $2\sigma$  ( $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение из данных на рисунке 4 за 2017 и 2022 гг., равное 0.0027 с), что составляет чуть более 0.005 с. Какие могут быть реальные изменения значений упругих параметров горных пород в зонах подготовки и разгрузки землетрясений и соответствующие им вариации времен пробега волн, просвечивающих очаги, однозначно сказать в настоящее время сложно. Несмотря на многочисленные попытки в прошлом как предсказать землетрясения, так и оценить точное значение прогнозных параметров, сделать это пока не удастся. Одними из наиболее распространенных изучаемых сейсмических предвестников являются изменение скоростей  $P$  и  $S$ - волн и их отношение ( $V_p/V_s$ ) [3, 4, 7, 8, 9, 10]. По данным наблюдений в Китае, Японии, Таджикистане (Гармский район), США (Калифорния) за несколько лет до сильного землетрясения отмечено было уменьшение значений соотношения  $V_p/V_s$  в ряде случаев на величину до 18% [4, 7, 10], а сами величины скоростей  $P$ - и  $S$ -волн могут изменяться соответственно на 4.6% и 4.3% [7, 10]. В соответствии с этими данными расчетные максимальные временные задержки для продольных и поперечных волн в аномальной 5-10 километровой зоне могут составлять около 0.045-0.090 с для  $P$ - и 0.08-0.16 с для  $S$ -волн. Близкие вариации времен получены при исследованиях на юге Камчатки в период Кроноцкого землетрясения ( $M=7.7$ , 05.12.1997) и последующий период афтершоковой активности [8]; средние значения вариаций  $\delta t_{ss}$  поперечных волн составляют 0.005мс/км и более, что в пересчете на 5-10 км будет составлять 0.025-0.050 с. Это очень большие вариации, если учесть, что они достигнуты в период регистрации как сильных, так и умеренных землетрясений с магнитудами от 5.0 до 5.5 [7, 8, 10]. В целом опыт многочисленных исследований по многим странам мира показал, что просвечивание при использовании естественных источников (землетрясения) не обеспечивает надлежащую точность в определении прогнозных параметров, в результате чего

могут быть зафиксированы ложные аномалии [4]. Опытов же с искусственными источниками, в особенности с вибраторами, когда обеспечивается большая стабильность источников и контроля параметров, пока не очень много [3, 5, 6].

### *Обсуждение результатов*

Результаты экспериментов по регистрации виброисточника ЦВ-40 в северо-западной части Алтае-Саянского региона на с/ст «NVS», с/ст «KLV01» в Горловском угольном бассейне и с/ст «CLR» в Кузбассе позволяют сделать следующие выводы:

1. При многолетних режимных вибросейсмических наблюдениях достигнута высокая точность измерений, составляющая 0.003-0.005 с; в экспериментах с регистрацией 40-тонного вибратора ЦВ-40 в Горловской впадине величина среднеквадратического отклонения ( $\sigma$ ) от измеряемой разности времен пробега на опорной с/ст «NVS» и с/ст «KLV01» составляет  $\pm 0.0027$  с, соответственно значимыми вариациями этой величины на уровне  $2\sigma$  будет  $\pm 0.0054$  с.

2. Рассчитанные (по общепринятым зависимостям средних размеров очагов землетрясения от величины магнитуды) размеры очагов техногенных землетрясений в районе разрезов Колыванский и Восточный в Горловской впадине с магнитудами до 4-4.5, произошедших в 2017-2022 гг., не превышают 5 километров.

3. Полученные в экспериментах с естественными источниками вариации времен пробега продольных волн (в пересчете на пятикилометровую аномальную зону подготовки землетрясения) могут составлять до 0.025 с, что в пять раз больше значимых вариаций параметра разности времен пробега продольных волн, которые могут быть установлены при режимных вибросейсмических наблюдениях в Горловской впадине.

4. Отсутствие значимых вариаций времен регистрации продольных волн на с/ст «Елбаш» (KLV01) в период техногенных землетрясений в районе разрезов Колыванский и Восточный в Горловской впадине с магнитудами до 4-4.5 может объясняться прохождением трассы вибросейсмического мониторинга в стороне (на 6-7 км) от зон техногенных активизаций, а также возможным значительным расхождением в оценках размеров очаговых зон техногенных землетрясений в осадочном чехле с использованием формул для природных землетрясений в кристаллических породах, равно как и ожидаемых аномалий времен пробега на основании не корректных экспериментов прошлых лет с естественными источниками.

5. Необходимо провести специальные эксперименты по увеличению количества вибрационных сеансов при мониторинге (до 10-15) для накопления качественных коррелограмм на с/ст «Усть-Чем» (KLV02) по трассе мониторинга, проходящей прямо через разрез Восточный и на небольшом удалении ( $\sim 2$  км) от разреза Колыванский.

## Выводы

Представлены результаты режимных вибросейсмических просвечиваний среды разработки крупнейших угольных разрезов под Новосибирском (разрезы Колыванский и Восточный по добыче антрацита) с повышенной техногенной нагрузкой, в которых зарегистрирован процесс ощутимых техногенно-природных землетрясений с магнитудой до 4.3. Описан подход по использованию в качестве прогнозного параметра разности времен регистрации продольных волн на опорной станции «Новосибирск» вдали от разрезов и данных станции «Елбаш» в пределах угольных разрезов с хорошим качеством материалов. Показана высокая точность мониторинга, составляющая  $\sim 0.003$  с. В многолетнем мониторинге установлено отсутствие значимых вариаций, что обуславливается малой областью деструкции техногенных землетрясений в осадочном чехле, которую не пересекает зона вибропросвечивания. При дальнейших наблюдениях целесообразно использование данных с близрасположенной к разрезу Восточный станции «Усть-Чем» и накоплении вибрационных сеансов при мониторинге (до 10-15) для получения качественных коррелограмм.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23-00/08) и с использованием данных, полученных на УНУ СИЗК МАК (<http://www.gstras.ru/unu/>). Авторы выражают признательность коллегам из ФИЦ ЕГС РАН, участвующим в получении и обработке экспериментальных данных, а также в обсуждении статьи.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в области сильного техногенного воздействия / Отв. ред. Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 632 с.
2. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В. и др. Техногенная сейсмическая активизация в районе Горловского угольного бассейна // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т.8. – № 1. – С. 207-211.
3. 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.
4. Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир. – 1988. – 373 с.
5. 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. – 2001. – С. 55-58.
6. Соловьев В.М., Кашун В.Н., Елагин С.А. и др. О влиянии сезонных изменений среды под вибратором ЦВ-40 на характеристики его излучения (при вибросейсмическом мониторинге Алтае-Саянского региона) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XIII международной научной конференции. – 2017. – Т.2. – №4. – С. 34-39.
7. Лукк А.А., Нерсесов И.Л. Природа временных вариаций скоростей упругих волн в земной коре Гармского района // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1978. – № 6. – С. 3-16.

8. Лунева М.Н., Ли Д.М. Исследование изменений параметров поперечных сейсмических волн от местных землетрясений в период 1996-1998 гг. на юге Камчатки. Напряженно-деформированное состояние литосферы: Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео». – 2003. – С. 346-350.
9. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М: Наука. – 1985. 408 с.
10. Садовский М.А., Нерсесов И.Л. Вопросы прогноза землетрясений. Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1978. – №9, – С. 13-30.

© В. М. Соловьев, А. Ф. Еманов, В. С. Селезнев, С. А. Елагин, Н. А. Галёва, 2023