

В. М. Соловьев¹✉, В. С. Селезнев², А. Ф. Еманов¹, А. А. Еманов¹, С. А. Елагин¹, Н. А. Галева¹

К использованию динамических характеристик волновых полей при вибромониторинге среды с мощными вибраторами

¹Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Сейсмологический филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: solov@gs.sbras.ru

Аннотация. Приведены результаты исследований характеристик излучения 40-тонного вибратора на Быстровском полигоне и волновых полей в дальней зоне в разные временные периоды. Показана повышенная чувствительность динамических параметров (по сравнению с кинематическими) при сезонных изменениях характеристик верхней части разреза как под виброисточником, так и в районе приемных станций. Описан подход по использованию динамических параметров при анализе рядов вибромониторинга. По результатам трехлетних режимных вибросейсмических наблюдений 2022-2024 гг. в районе угледобывающих разрезов Колыванский и Восточный в Горловской впадине выявлены вариации отношений амплитуд продольных волн на с/ст «Елбаш» в районе разрезов и опорной с/ст «Новосибирск», коррелирующие с графиком разности продольных волн на этих сейсмостанциях.

Ключевые слова: вибратор ЦВ-40, вибромониторинг, амплитуды, ряды наблюдений

V. M. Solovyev¹✉, V. S. Seleznev², A. F. Emanov¹, A. A. Emanov¹, S. A. Elagin¹, N. A. Galeva¹

On the use of dynamic characteristics in vibration monitoring of environments with powerful vibrators

¹Altai–Sayan Branch of the FRC UGS RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Seismological Branch of the FRC UGS RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: solov@gs.sbras.ru

Abstract. The research results on the radiation characteristics of a 40-ton vibrator at the Bystrovsky test site and wave fields in the far zone during different time periods are presented. Increased sensitivity of dynamic parameters (compared to kinematic ones) is shown with seasonal changes in the characteristics of the upper part of the geological section, both under the vibration source and in the vicinity of the receiving stations. An approach for using dynamic parameters in the analysis of vibration monitoring data for probed objects is described. Based on the results of three years of continuous vibroseismic observations from 2022-2024 in the area of the Kolyvansky and Vostochny coal mining pits in the Gorlovskaya depression, variations in the amplitude ratios of longitudinal waves at seismic station "Elbashi" near the pits and the reference seismic station "Novosibirsk" have been identified. These variations correlate with the difference in longitudinal waves at these seismic stations.

Keywords: CV-40 vibrator, vibration monitoring, amplitude, observation series

Введение

В 21-ом тысячелетии в связи с значительным развитием аппаратурно-технологического сопровождения существенно возрос объем мониторинговых геофизических исследований в зонах сейсмических активизаций, ответственных объек-

тов (ГЭС, АЭС, ГХК и др.), районах нефтегазодобычи, разработки угольных и рудных месторождений, искусственных водохранилищ. В качестве источников, наряду с землетрясениями, в ряде технологий применяется просто накопление сейсмического шума. Ограничение этих методов мониторинга связано с нестабильностью источников, в первом случае, и значительным временем накопления, во втором. В этом плане определенные надежды исследователей связываются с развитием вибрационных технологий с высокой стабильностью вибрационных воздействий при мониторинге напряженного состояния массивов в зонах сейсмических активизаций [1, 2, 9, 11].

Ниже представлены результаты экспериментов по режимным вибросейсмическим наблюдениям в северо-западной части Алтае-Саянского региона, показаны возможности и ограничения вибромониторинга в условиях Сибири, а также расширения информативных параметров за счет привлечения динамических характеристик зондируемых сигналов.

О возможностях вибромониторинга зон сейсмических активизаций

Ряд экспериментов в летнее время в районе Быстровского вибросейсмического полигона показывали на высокую стабильность повторных сеансов на удалении 50 км от вибратора ЦВ-40 в течение нескольких дней, достигающую по кинематике в 0.001 с [9]. Анализ графиков разности времен продольной волны от повторных сеансов (с перерывом в 6-8 часов) за длительный период мониторинговых наблюдений с 2007 по 2024 гг. показывает, что средние значения отклонений (по модулю) также составляют ~0.001-0.002 с, а единичные, практически не более ± 0.005 -0.01 с. Наблюдения выполнялись на с/ст «Новосибирск» в стационарном павильоне (на 3-х компонентных сейсмоприемниках, установленных на постаменте на коренных породах) в северо-западной части Алтае-Саянского региона с слабой сейсмической активностью, где отсутствует вероятность значительных изменений упругих характеристик земной коры.

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. На основании многочисленных публикаций 1970-1990 годов по данным наблюдений в Китае, Японии, Таджикистане (Гармский район), США (Калифорния), Россия до сильного землетрясения (от нескольких месяцев до несколько лет) отмечено было уменьшение значений соотношения скоростей V_p/V_s в ряде случаев на величину до 18% [3, 5, 6], а сами величины скоростей Р- и S-волн могут изменяться соответственно на 4.6% и 4.3% [3, 6]. В ряде других исследований, в том числе и современных с использованием искусственных источников (пневмоисточников и вибрационной системы АКРОСС) и взрывов, либо не были получены значимые вариации скоростей упругих волн, либо изменения составляли в пределах 1% от значений скорости [4, 11]. Соответственно сами временные вариации на 5-10-ти километровую зону

землетрясения с магнитудой ~ 6.0 могут составлять для Р-волн около 0.008-0.015 с, что представляет крайне малую величину для обнаружения даже при использовании искусственных источников при мониторинге. Реально, как отмечалось выше, значимые вариации могут быть еще меньше или отсутствовать. Так по результатам трехлетних вибропросвечиваний по трассе распространения 100 тонный вибратор-сейсмостанция Тырган через высокосейсмичную Байкальскую рифтовую зону (где в год в среднем происходит до 10 000 землетрясений с магнитудой до 6.0) исследователями [2] выделен тренд в вариациях времен вступления, составляющий всего величину 0.6–0.7 мсек/год; безусловно, он не представляется значимым, поскольку практически на порядок меньше надежного установленной при многолетних наблюдениях на Быстровском полигоне точности вибромониторинга в 0.001-0.002 с [9].

Ограничения вибромониторинга в условиях Сибири и способы повышения его информативности

Проведенные ранее эксперименты с вибраторами ЦВМ-100 и ЦВ-40 [8, 10] показали сильную сезонную зависимость характеристик излучения вибратора, когда сильно меняются упругие параметры среды под виброисточником (промерзание, оттаивание, обводнение...). В ряде полевых экспериментов на опорных профилях в зоне вечной мерзлоты было показано, что в условиях неоднородной верхней части разреза (зоне ВЧР) даже в относительно стабильный летний период характеристики излучения меняются даже при повторных экспериментах в течение дня [7, 8]. Для «полноценного» мониторинга необходимо знать и учитывать (исключать) вариации характеристик в ближней зоне источника и приемника, оставляя вариации параметров волнового поля в просвечиваемой среде. Для исключения сезонных изменений в районе виброисточника при режимных вибросейсмических наблюдениях анализируется разность времен прихода двух волн, например Р-и S-волн на одной коррелограмме, как это показано в [1], либо двух продольных волн, регистрируемых от вибратора на опорной сейсмостанции в стороне от просвечиваемого объекта и станциях в пределах зоны просвечивания [1, 10]. Так при вибромониторинге земной коры Горловского угленосного бассейна (рис. 1) в качестве прогнозного параметра достаточно эффективным оказалось использование разности времен регистрации продольных волн на опорной станции «Новосибирск» (NVS) вдали от разрезов и данных станции «Елбаши» (KLV01) в пределах угольных разрезов с хорошим качеством материалов [10].



Рис. 1. Схема режимных вибросейсмических исследований в районе угледобывающих разрезов Колыванский и Восточный. На врезке – эпицентры землетрясений в районе Горловской впадины в 2022-2024 гг.

Наряду с кинематическими характеристиками при мониторинге необходимо использовать дополнительные параметры и, прежде всего, высокочувствительную к изменениям в среде динамику волн (вариации амплитуд, поляризацию и др.). Ранее изменения динамических параметров связывались, главным образом, с изменениями в районе источника [8, 10]. Как сильно влияет изменение характеристик верхней части разреза в районе приемников в течение года на динамику волн практически не рассматривалось. Ниже рассмотрены примеры динамической повторяемости волновых полей от вибратора ЦВ-40 как в стабильные периоды, так и в межсезонье, в том числе на разных станциях.

На рисунке 2А приведены примеры июньских и октябрьских суточных повторных сеансов на сейсмостанции «Новосибирск» (NVS).

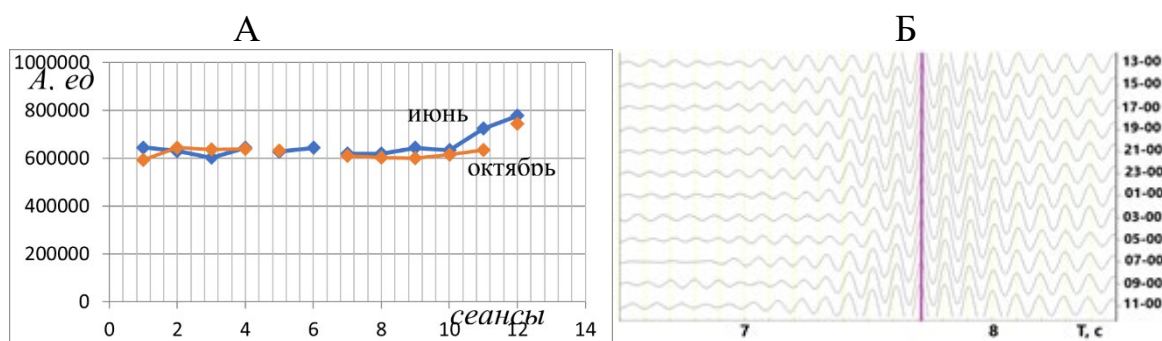


Рис. 2. Графики максимальных амплитуд продольной преломленной волны при суточном мониторинге на сейсмостанции NVS 21-22 июня и 12-13 октября 2023 года (А) и коррелограммы от вибратора ЦВ-40 на сейсмостанции NVS 21-22 июня 2023 года

Из графиков на рисунке 2А следует, что средние отклонения амплитуд (без учета скачков амплитуд на 11-12 сеансах, что обусловлено включением в резонанс более толстого слоя из-за большого поступления тепла под вибратор [10]) составляют 15000-20000 единиц, или 2.5-3% от средней амплитуды.

Эти, в целом небольшие, колебания амплитуд связаны с физическими процессами в самой верхней низкоскоростной части разреза при работе и простое вибратора. Времена максимумов амплитуд при суточном мониторинге практически не меняются (рис. 2Б), что согласуется с ранее проведенными экспериментами на повторяемость вибрационных сеансов в течение нескольких дней [9].

Сезонные колебания амплитуд более значительные и изменяются в 4-5 раз и более от максимальной амплитуды в годовом мониторинге (рис. 3).

Из графиков на рисунках 3А и 3Б по данным со станции NVS отчетливо виден достаточно близкий спад амплитуд (~800000-900000 ед.) в период после оттаивания грунта (весна-лето) до промерзания (осень-зима). Для станции KLV01 в эти периоды (в разные годы) также близкие зависимости (~1400000-2000000 ед.), однако сам наклон графиков в два раза сильнее, чем на станции NVS.

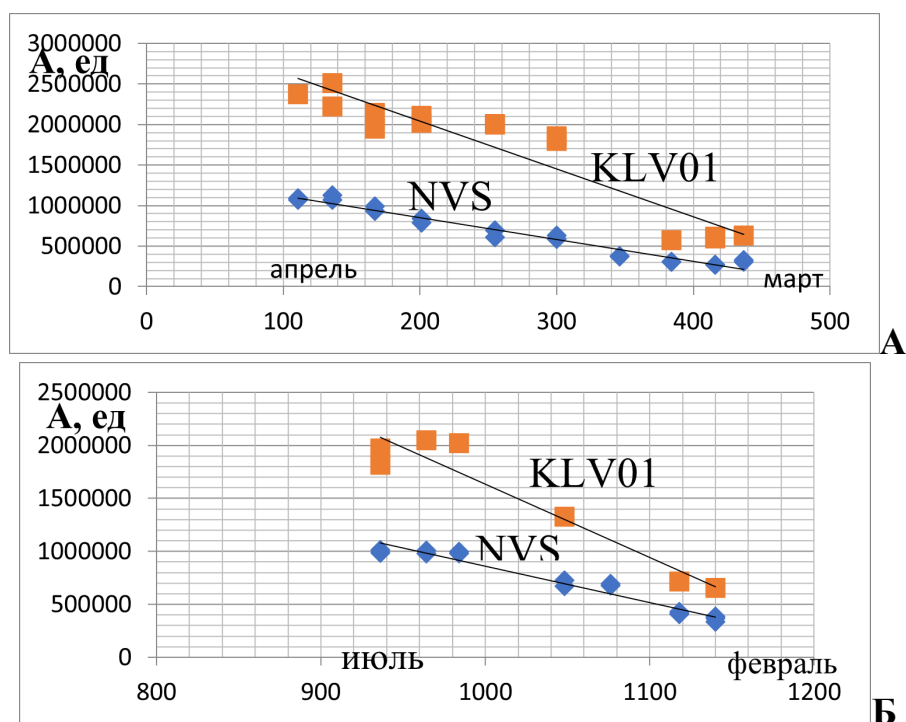


Рис. 3. Графики максимальных амплитуд продольных волн при режимных наблюдениях на сеймостанциях NVS и KLV01 в 2022-2023 гг. (А) и 2024-2025 гг. (Б)

Поскольку данные получены от одного источника на близких расстояниях и по близкому азимуту (рис. 1), можно считать сезонные изменения в источнике

для обоих графиков одинаковыми, а все расхождения отнести за счет условий приемных станций.

Более стабильные, не подверженные влиянию сезонных изменений, условия приема обеспечены в термостатированном павильоне с/ст «Новосибирск» (NVS) с датчиками на постаменте на кристаллических породах. На станции «Елбаши» (KLV01) приемники находятся в осадочном слое Горловской впадины, низкоскоростная верхняя часть которой более подвержена условиям промерзания и оттаивания. В этом плане с/ст KLV01 представляется более «чувствительной» к локальным изменениям в среде под сейсмоприемниками, чем сейсмостанция NVS, которую при мониторинге можно принимать как опорную точку.

Временные изменения на станциях NVS и KLV01 в эти периоды не превышали 2-3% от полного времени пробега [10].

Результаты выполненных круглогодичных экспериментов в ближней и дальней зоне виброисточника ЦВ-40 показывают:

- сезонные изменения в среде под вибратором приводят к более сильному изменению динамических характеристик регистрируемых волновых полей в ближней и дальней зоне, по сравнению с вариациями кинематических параметров;

- сильные сезонные изменения в амплитудах регистрируемых сигналов происходят и из-за изменений характеристик условий приема, причем более сильные при размещении станций в низкоскоростных осадочных породах, по сравнению со станциями на высокоскоростных грунтах.

В этой связи, для выявления незначительных изменений упругих характеристик в просвечиваемой среде, где для их обнаружения «чувствительности кинематики» недостаточно, может оказаться более эффективным использование при анализе рядов вибромониторинга динамических параметров.

Необходима разработка методики использования вариаций динамических параметров для выявления незначительных изменений в среде при вибромониторинге слабоактивных сейсмогенных зон.

Ниже, на рисунке 4, представлен пример одного из подходов разрабатываемой методики, заключающийся в сравнительном анализе вариаций кинематических и динамических параметров с использованием рядов вибромониторинга в опорной точке (с/ст NVS, рис. 1) и в районе объекта просвечивания (с/ст KLV01 в районе угледобывающих разрезов Колыванский и Восточный, рис. 1).

На рисунке 4А (представленного ранее в работе [10]) на графике разности времен продольных волн на сейсмостанциях KLV01 и NVS выделяется минимум в конце 2023 года и начале 2024 года перед ощутимым землетрясением с магнитудой $M_L=4.7$ в северном окончании Колыванского разреза (рис. 1); для этого периода отмечено также уменьшение примерно в 2 раза количества зарегистрированных землетрясений и повышение суммарной энергии [10].

При анализе динамических параметров (рис. 4Б) рассматривались отношения амплитуд на станции KLV01 и NVS, что, как и при построении кинематических

графиков разности времен прихода продольных волн, позволяет убрать сильные сезонные изменения амплитуд в районе виброисточника.

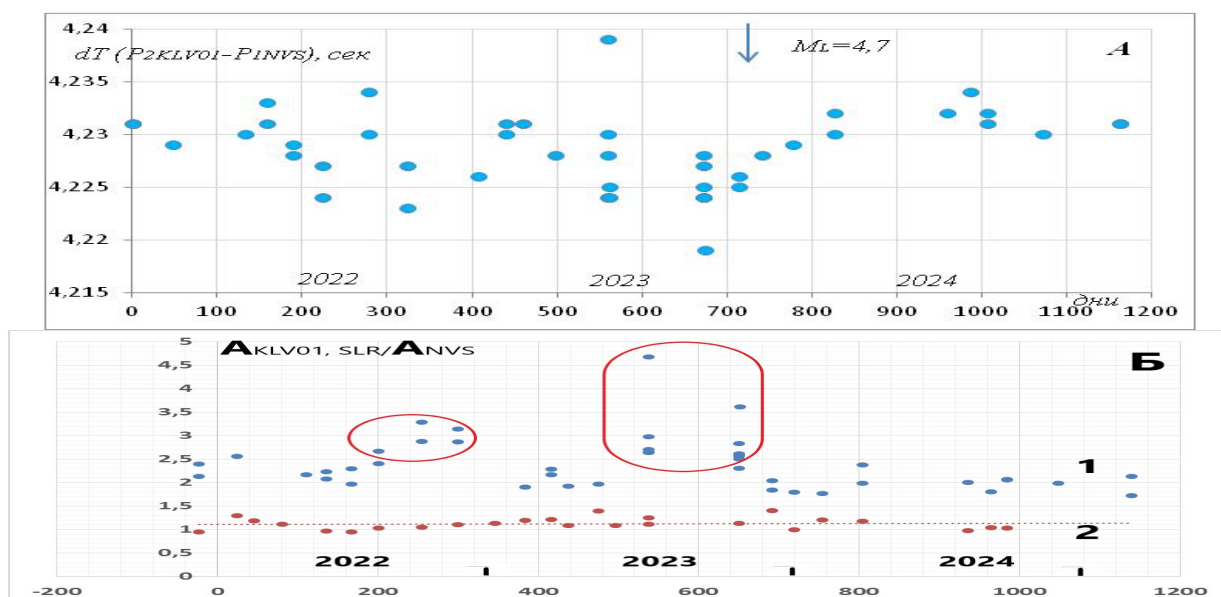


Рис. 4. К сравнительному анализу вариаций кинематических (А) и динамических (Б) параметров при вибромониторинге угледобывающих разрезов Горловской впадины. 1, 2 – графики отношений амплитуд на станциях KLV01 и NVS и «Салаир» и «Новосибирск»

Для сравнения рассматривался также график отношения амплитуд на станциях «Салаир» (SLR) и «Новосибирск» (NVS), удаленных на значительных расстояниях от угольных разрезов Колыванский и Восточный. Значения отношений амплитуд в анализируемый период мониторинга в 2022-2024 гг. на данном графике значительно не меняются и практически не превышают 1.1-1.3 при средних значениях 1.1-1.2; на графике отношений амплитуд для с/ст KLV01 и NVS явно выделяются два максимума с значениями >2.5 при средних значениях 2.1-2.2. Центральный максимум фактически совпадает с выделенным минимумом на графике разности времен в конце 2023 года (рис. 4А). С большей вероятностью выявленная корреляция не случайна; повышение амплитуд в этот период на станции KLV01 может быть также связано с повышением скорости упругих волн в верхней части земли в районе Колыванского разреза перед землетрясением с магнитудой 4.7, которое произошло под воздействием уплотнения пород при широкомасштабных угледобывающих разработках.

Локальный максимум амплитуд во второй половине 2022 года пока объяснить затруднительно; хотя на графике разности времен здесь также отмечено некоторое уменьшение (рис. 4А).

Заключение

По результатам круглогодичных экспериментов в ближней и дальней зоне виброисточника ЦВ-40 (на Быстровском полигоне) установлена повышенная

чувствительность динамических параметров (по сравнению с кинематическими) при сезонных изменениях характеристик верхней части разреза по трассе мониторинга; это диктует необходимость их использования при анализе рядов вибромониторинга просвечиваемых объектов.

По результатам режимных вибросейсмических наблюдений в районе разрезов Колыванский и Восточный в Горловской впадине выявлены вариации отношений амплитуд продольных волн на с/ст «Елбаши» (KLV01) и опорной с/ст «Новосибирск» (NVS), коррелирующие с графиком продольных волн на этих сейсмостанциях. Отмечается максимум отношений амплитуд в конце 2023 года и начале 2024 года, для которого отмечено уменьшение разности времен продольных волн примерно на 0.005-0.007 с, а также уменьшение примерно в 2 раза количества зарегистрированных землетрясений и повышение суммарной энергии. Данные графика амплитуд подтверждают высказанное ранее предположение, что при сильном увеличении угольных разработок в 2022-2023 гг. произошло уплотнение пород и накопление потенциальной энергии, которое привело к разрядке в виде крупного события с $M=4.7$ в конце 2023 года.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00609-26) 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».

Авторы выражают признательность коллегам из Алтае-Саянского и Сейсмологического филиалов ФИЦ ЕГС РАН за участие в экспериментах и ценные замечания при обсуждении статьи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В. и др. 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.
2. Ковалевский В.В., Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д. Выделение медленных вариаций времен вступлений волн при коррекции сезонных изменений вибросейсмограмм. Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 1. С. 180-186.
3. 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.
4. МакЭвилли, ТВ; Джонсон, Л.Р. (апрель 1974 г.), «Стабильность скоростей Р и S, полученных при взрывах в карьерах Центральной Калифорнии», Бюллетень сейсмологического общества Америки, 64 (2): 343–353, Bibcode: 1974BuSSA.64..343M, doi: 10.1785/BSSA0640020343, S2CID 130963434.
5. Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988, 373 с.
6. Садовский М.А., Нерсесов И.Л. Вопросы прогноза землетрясений. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1978. N 9, с. 13-30.
7. Селезнев В.С., Соловьев В.М., Еманов А.Ф. и др. Глубинные вибросейсмические исследования на Дальнем востоке России // Проблемы информатики, №3 (20). 2013. С. 30-41.

8. Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М. и др. Активная сейсмология и ГСЗ с мощными вибраторами в Сибири // Проблемы информатики, г. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН. – 2018. N4. – С. 347-354.
9. Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Еманов А.А., Корабельщиков Д.Г. Быстровский вибросейсмический полигон ФИЦ ЕГС РАН как уникальный объект для разработки и экспериментального опробования новых геофизических технологий. Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2.
10. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф. и др. О длительности сезонных изменений среды под мощным виброисточником и вибромониторинг угледобывающих разрезов Горловской впадины // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. Новосибирск: СГУГиТ, 2025. Т 2. N 3. С. 132-139.
11. Цудзи, С., Ямаока, К., Икута, Р. и др. Вековые и косейсмические изменения скорости поперечных волн, обнаруженные с помощью ACROSS в регионе Токай. Earth Planets Space 70, 146 (2018), P. 1-10. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0917-2>.

© В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, С. А. Елагин,
Н. А. Галева, 2026